

**Simulación numérica del ensayo de
panel cuadrado de hormigón
reforzado con fibra.**

Treball realitzat per:
Carla Teresa Vintimilla Molina

Dirigit per:
Climent Molins Borrell
Sergio Carmona Malatesta

Màster en:
Ingeniería Estructural y de la Construcción

Barcelona, Octubre 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DECA)

TREBALL FINAL DE MÀSTER



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

TESI DE MÀSTER

Màster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Títol

**Simulación numérica del ensayo de panel cuadrado de hormigón
reforzado con fibra.**

Autor

Carla Teresa Vintimilla Molina

Tutor

**Climent Molins Borrell
Sergio Carmona Malatesta**

Intensificació

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Data

Octubre 2019

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero extender mis agradecimientos a mi tutor, Climent Molins Borrell por el interés mostrado en esta tesina, ya que en todo el proceso de preparación y elaboración he contado con su apoyo y colaboración, siempre dispuesto a compartir sus conocimientos y experiencia, guiándome, aconsejándome y atendiendo mis preguntas en todo momento que han sido de mucha ayuda para completar el presente trabajo.

Quisiera agradecer de igual manera a mi tutor alterno Sergio Carmona, que en todo momento estuvo dispuesto a colaborar con la información necesaria de los ensayos realizados en laboratorio, fotos, videos y documentos valiosos para el desarrollo de esta tesina.

Me gustaría agradecer a la Universidad Politécnica de Cataluña por permitirme estudiar el Master y de manera muy especial a todos los catedráticos del departamento de Ingeniería Estructural y de la Construcción, muchas gracias por el conocimiento impartido.

No quiero dejar pasar la oportunidad de agradecer a mi familia por el apoyo brindado a lo largo de mi estancia en Barcelona, quiero agradecer de manera especial a mi padre Eduardo Vintimilla y a mi madre Teresa Molina, que siempre han sido mi apoyo incondicional y que en cada momento de mi vida me han guiado a cumplir mis sueños, siendo mi pilar fundamental a pesar de la distancia siempre han estado en mi corazón, quiero agradecer a mis hermanos que con cada una de sus acciones me impulsan a seguir adelante y que ocupan la otra mitad de mi corazón gracias Jhojana, Benjamín y Diego.

Por último y no menos importante quiero extender mis agradecimientos a mis amigos y compañeros que a lo largo de este camino se convirtieron en hermanos de diferentes nacionalidades, ayudándonos y apoyándonos no solo en la universidad sino en cada instante de nuestras vidas, muchas gracias chicos hicieron que mi instancia sea más fácil.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL ENSAYO DE PANEL CUADRADO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA.

Autor: Carla Teresa Vintimilla Molina

Tutores: Climent Molins Borrell, Sergio Carmona

RESUMEN

En el ámbito de las estructuras el hormigón ha sido uno de los materiales más utilizados. En los últimos años se ha profundizado la utilización de distintas tipologías por ejemplo el hormigón proyectado o el hormigón con fibras. El hormigón reforzado con fibras (HRFA), ha revolucionado el mercado, ya que además de disminuir los costos operativos, actúan de manera estructural. Debido a la adición de fibras que mejoren sus características como tenacidad, control de fisuración y resistencia al flexo compresión. El aumento de la tenacidad es una de las características más apreciadas de los hormigones reforzados con fibras.

Actualmente las especificaciones para el shotcrete reforzados con se controlan a través de su capacidad de absorber energía, misma que se determina mediante el ensayo de panel de acuerdo a los procedimientos establecidos por la organización europea “European Federation of National Associations Representing for Concrete” (EFNARC) en 1996. Este ensayo consiste en someter a flexión un panel de 600 mm x 600 mm x 100 mm, el que se apoya en sus cuatro aristas y se carga en el centro hasta alcanzar una deflexión central de 25mm.

En este trabajo se plantea estudiar numéricamente el comportamiento de la placa de hormigón con fibras, donde el principal objetivo es simular el comportamiento de placas de estas caracterizas con una de las herramientas informáticas DIANA-FEA. Se pretende reproducir numéricamente los ensayos experimentales realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Marina en Valparaíso-Chile. Para lograr el objetivo propuesto se elaboraron y ensayaron paneles usando mezclas de hormigón diseñadas para shotcrete, reforzadas con 4, 8 y 12kg/m³de hormigón. Con los resultados de los ensayos se determinó la energía disipada y la capacidad de absorción de energía de las probetas.

NUMERICAL SIMULATION OF THE SQUARE PANEL OF REINFORCED CONCRETE PANEL WITH FIBER.

Author: Carla Teresa Vintimilla Molina

Tutors: Climent Molins Borrell, Sergio Carmona

ABSTRACT

In the field of structures, concrete has been one of the most used materials. In recent years, the use of different types has been deepened, for example, shotcrete or fiber concrete. Fiber reinforced concrete (HRFA) has revolutionized the market, since in addition to reducing operating costs, they act structurally. Due to the addition of fibers that improve their characteristics such as toughness, cracking control and flexural compression resistance. The increase in toughness is one of the most appreciated characteristics of fiber reinforced concrete.

Currently the specifications for the shotcrete reinforced with are controlled through its ability to absorb energy, which is determined by the panel test according to the procedures established by the European organization “European Federation of National Associations Representing for Concrete” (EFNARC) in 1996. This test consists of flexing a 600 mm x 600 mm x 100 mm panel, which is supported by its four edges and is loaded in the center until it reaches a central deflection of 25 mm.

This paper proposes to study numerically the behavior of the concrete plate with fibers, where the main objective is to size and check plates of these characteristics with one of the DIANA-FEA computer tools. It is intended to reproduce numerically the experimental tests carried out at the Technical University Santa Marina in Valparaiso Chile. To achieve the proposed objective, panels were developed and tested using concrete mixtures designed for shotcrete, reinforced with 4, 8 and 12kg / m³ of concrete. The dissipated energy and the energy absorption capacity of the specimens were determined with the results of the tests.

GLOSARIO

- ✓ E Modulo elástico del hormigón
- ✓ σ_c Tensión máxima de compresión
- ✓ σ_{pc} Tensión post-fisuración de tracción del HRFA
- ✓ $\epsilon_{c,max}$ Máxima deformación a compresión
- ✓ $\epsilon_{t,max}$ Máxima deformación
- ✓ ω Apertura de fisuración
- ✓ f_{ct} Resistencia a tracción del hormigón
- ✓ f_{ck} Resistencia característica a compresión
- ✓ f_{cm} Resistencia a la compresión
- ✓ f_{cd} Resistencia a la compresión de diseño
- ✓ Shotcrete Hormigón proyectado en inglés.
- ✓ ASTM American Society for Testing and Materials, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.
- ✓ HRF Hormigón Reforzado con Fibras
- ✓ EFNARC European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete. Expertos en Construcción Especializada y Sistemas de Hormigón.
- ✓ CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). Desplazamiento de apertura de boca de grieta.

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	2
CAPITULO 2.....	4
2.1 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS.....	4
2.1.1 Ventajas e inconvenientes de los HRFA.....	5
2.1.2 Aplicaciones generales del HRFA.....	8
2.2 HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO.....	11
2.2.1 Cemento.....	11
2.2.2 Áridos.....	12
2.2.3 Agua.....	13
2.2.4 Fibras de acero.....	14
2.2.5 Fibras sintéticas Barchip.....	16
2.3 NORMATIVAS EXISTENTES REFERENTES AL HRFA.....	18
2.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HRFA.....	19
2.4.1 Resistencia a tracción.....	19

2.4.2	Resistencia a flexión.....	20
2.4.3	Resistencia al impacto	20
2.4.4	Resistencia a la compresión	21
2.4.5	Tenacidad	21
2.5	ENSAYO DE PANEL CUADRADO EFNARC, ABSORCIÓN DE ENERGÍA Y TENACIDAD.....	22
2.5.1	Curva desplazamiento/carga	25
2.5.2	Curva desplazamiento/Energía.....	26
2.5.3	Clasificación de la tenacidad EFNARC	26
2.5.4	Efecto de la fricción en los paneles-soporte.....	28
2.6	MODELIZACIÓN NUMÉRICA Y COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL HORMIGÓN CON FIBRAS.	29
2.6.1	Modelización numérica de los elementos	29
2.6.2	Modelos de fisuración	30
2.7	ECUACIONES CONSTITUTIVAS NO LINEALES DEL MATERIAL.....	33
2.7.1	Estudios de la ecuación constitutiva del HRFA	33
2.7.2	Modelos a compresión.	34
2.7.3	Modelos tensión-ancho de fisura ($\sigma - \omega$) / Modelos tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$)	
	35	
	CAPITULO 3.....	44

3.1	INTRODUCCIÓN.....	44
3.2	DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS.....	45
3.2.1	Propiedades de los materiales	46
3.2.2	Resultados de caracterización en ensayo de viga: Carga-CMOD.....	47
3.3	DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL PANEL	55
3.3.1	Resultados experimentales	55
3.3.2	Tipo de rotura	56
3.3.3	Ensayo panel EFNARC.....	57
3.3.4	Parámetros mecánicos del material según fib Model Code 2010	62
	CAPITULO 4.....	65
4.1	INTRODUCCIÓN.....	65
4.2	BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DIANA-FEA.....	66
4.3	DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	67
4.3.1	Tipo de elemento, Vigas.....	68
4.3.2	Tipo de elemento panel EFNARC	69
4.3.3	Ecuaciones constitutivas no lineales de los materiales	70
4.4	CÁLCULO EN DIANA-FEA	74
4.4.1	Método de Newton-Raphson Regular	75
4.4.2	Método de Newton-Raphson modificado.	76
4.4.3	Método de la rigidez lineal o constante (linear and constant Stiffness).....	77

4.4.4	Método de longitud de arco (Arc-Length)	78
4.4.5	Incremento de carga	78
4.4.6	Criterio de convergencia	80
CAPITULO 5.....		81
5.1	INTRODUCCIÓN.....	81
5.2	ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN EN VIGAS	82
5.3	COMPARACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE LOS RESULTADOS	
PANEL EFNARC		88
5.3.1	Comparativa carga-desplazamiento experimental 4kg/m ³ DIANA-FEA	88
5.3.2	Comparativa Energía-desplazamiento experimental 4kg/m ³ DIANA-FEA.....	91
	Comparativa carga-desplazamiento experimental 8kg/m ³ DIANA-FEA.....	98
5.3.3	98
5.3.4	Comparativa carga-desplazamiento experimental 12kg/m ³ DIANA-FEA	101
CAPITULO 6.....		107
6.1	CONCLUSIONES.....	107
6.2	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	110
CAPITULO 7.....		111
CAPITULO 8.....		114
8.1	INTRODUCCIÓN.....	114
8.2	ENSAYO EXPERIMENTAL	115

8.2.1	Caracterización de material	115
8.2.2	Modelo de elementos finitos	116
8.2.3	Condiciones de contorno	119
8.2.4	Análisis no lineal	122
8.2.5	Resultados	122
8.2.6	Conclusiones	125
8.3	Análisis inverso/Análisis directo	126
8.4	Cálculo del diagrama de interacción según la RILEM	127
8.4.1	Relación deformación δ -w	127
8.4.2	Equivalencia entre δ obtenida por la NBN y CMOD para la RILEM	127
8.4.3	Cálculo del diagrama de interacción según la ehe 2007	129

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras mm de longitud)	
Fuente:(Hannat,1978)	13
FIGURA 2-2 Tipos de sección de fibras Fuente Sustitución del hormigón armado por hrfa en forjados convencionales de edificación.[4].....	15
FIGURA 2-3 Formas geométricas de las fibras Fuente: Sustitución del hormigón armado por HRFA en forjados convencionales de edificación. [4]	16
FIGURA 2-4 Tipo de fibras sintéticas. Fuente [12]	16
FIGURA 2-5 Modelo a escala del Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC. Fuente:[14]	23
FIGURA 2-6 Diagrama de ensayo de panel EFNARC, medidas de apoyo y la carga central. Fuente: Use of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of frs in tunneling [16]	24
FIGURA 2-7 Grafico Tipo, Carga-Desplazamiento. Fuente: Caracterización de propiedades de hormigones con fibras sintéticas modificadas con polímeros [14]	25
FIGURA 2-8 Grafico tipo, Energía-desplazamiento. Fuente: Caracterización de propiedades de hormigones con fibras sintéticas modificadas con polímeros [14]	26
FIGURA 2-9 Modelos de fisuración ortogonal. Fuente: Comportamiento no lineal de vigas isostáticas de hormigón parcialmente pretensado.....	32
FIGURA 2-10 Modelos de Compresión. Fuente: DIANA-FEA[19].....	35
FIGURA 2-11 Relación esfuerzo-desplazamiento, ensayo uniaxial de tracción , subdivididos en una relación de tensión-deformación general y una relación de tensión-desplazamiento para las deformaciones locales. Fuente:[19]	36

FIGURA 2-12 Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y tracción. Fuente:[17]	36
FIGURA 2-13 Modelos de Tensión. Fuente: DIANA-FEA[19]	38
FIGURA 2-14 : Ecuaciones $\sigma - \epsilon$ para el HRFA propuestas en la literatura. Tensión-Deformación. Fuente:[17]	39
FIGURA 2-15 Ecuaciones $\sigma - \epsilon$ para el HRFA propuestas en la literatura. Tensión-Ancho de fisura. Fuente:[17]	39
FIGURA 2-16 Configuración de prueba requerida en EN 14651(Dimensiones en mm). Fuente: fib Model Code[25]	42
FIGURA 2-17 Curva típica de carga $F - \text{CMOD}$ para hormigón plano y FRC. Fuente: fib Model Code[25]	43
FIGURA 3-1 Detalle del ensayo “Three point bending test”	45
FIGURA 3-2 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54.Fuente:	48
FIGURA 3-3 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia	48
FIGURA 3-4 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia	49
FIGURA 3-5 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54. Fuente: Elaboración propia.	50
FIGURA 3-6 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio. Fuente: Elaboración propia.	50

FIGURA 3-7 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia	51
FIGURA 3-8 Digrama carga -CMOD de vigas con 12 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54. Fuente: Elaboración propia.	52
FIGURA 3-9 Diagrama carga CMOD de vigas con 12 [Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio. Fuente: Elaboración propia.	52
FIGURA 3-10 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 12[Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia	53
FIGURA 3-11 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 12[Kg/m ³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia	54
FIGURA 3-12 Detalle de la geometría de panel EFNARC. Fuente: Elaboración propia.	55
FIGURA 3-13 Detalle de la formación de grietas radiales panel de EFNARC con diferentes cuantías de fibra. Fuente: Ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Marina, Valparaíso-Chile	56
FIGURA 3-14 Geometría para el cálculo del efecto de arco en el panel agrietado. Fuente: Use of Barcelona test for controlling energy absorption.....	57
FIGURA 3-15 Carga vs Deformación ensayos experimentales-4kg/m ³ . Fuente: Elaboración .	59
FIGURA 3-16 Carga vs Deformación ensayos experimentales-8kg/m ³ . Fuente: Elaboración propia	59

FIGURA 3-17 Carga vs Deformación ensayos experimentales-12kg/m ³ . Fuente: Elaboración propia	60
FIGURA 3-18 Carga vs Deformación extensómetro. Fuente: Elaboración propia	60
FIGURA 3-19 Energía Absorbida en J hasta los 25mm de deflexión. Fuente: Elaboración propia	62
FIGURA 4-1 Programa comercial DIANA FEA .Fuente: DIANA-FEA.....	67
FIGURA 4-2 Modelos de fisuración. Fuente: fib Model Code	68
FIGURA 4-3 Modelo numérico de panel EFNARC en 3D, programado en DIANA-FEA	69
FIGURA 4-4 Modelo numérico de panel EFNARC en 3D, programado en DIANA-FEA	70
FIGURA 4-5 Longitud equivalente basada en dimensiones de elemento y dirección de grieta:	70
FIGURA 4-6 Detalles de las condiciones de contorno. Fuente: Elaboración propia DIANA-FEA	74
FIGURA 4-7 Iteración con el modelo Newton-Raphson Regular. Fuente: DIANA-FEA	76
FIGURA 4-8 Iteración con el modelo Newton-Raphson Modificado. Fuente: DIANA-FEA	76
FIGURA 4-9 Iteración con el método rigidez inicial. Fuente: DIANA-FEA.....	77
FIGURA 4-10 Longitud de arco . Fuente: DIANA-FEA	78
FIGURA 4-11 Ubicación de la carga en el centro del panel EFNARC. Elaboración propia DIANA-FEA.....	79
FIGURA 4-12 Comportamiento de la carga en el centro del panel EFNARC. Elaboración propia DIANA-FEA.....	79
FIGURA 5-1 Carga-CMOD de vigas caracterizadas con hormigón reforzado don fibras Barchip 54 En DIANA FEA. Elaboración propia	83

FIGURA 5-2 Carga-deformación de vigas caracterizadas con hormigón reforzado con fibras Barchip 54 Experimentales Elaboración propia DIANA-FEA.....	83
FIGURA 5-3 Relación Deformación-Ancho de Grieta con fibras Barchip 54 de 4 g/m ³ -8 g/m ³ -12Kg/m ³ respectivamente. Elaboración propia DIANA-FEA.....	84
FIGURA 5-4 Deformación de vigas con fibras Barchip 54 de 4 g/m ³ -8 g/m ³ -12Kg/m ³ respectivamente.....	84
FIGURA 5-5 Ancho de grieta de vigas con fibras Barchip 54 de 4 g/m ³ -8 g/m ³ -12Kg/m ³ respectivamente.....	85
FIGURA 5-6 Comportamiento tensional de la zona fisurada. Elaboración propia DIANA-FE86	
FIGURA 5-7 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4kg/m ³	90
La FIGURA 5-8,	92
FIGURA 5-9 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4kg/m ³	92
FIGURA 5-11 Comparativa-Experimental-Diana FEA Deformación en el panel EFNARC-4kg/m ³	93
FIGURA 5-13 Propagación de las fisuras en el panel EFNARC- DIANA FEA-4kg/m ³ . Vista en Planta.....	94
Las fisuras existentes en el panel modelizado numéricamente coincide con los resultados experimentales, donde, se puede apreciar que, para bajas cantidades de fibras, en este caso 4Kg/m ³ , la falla se produce por flexión, con la formación de dos grietas perpendiculares como se muestra en FIGURA 5-14. Se muestra el patrón y el ancho de fisuración bajo la carga característica - experimental y predicho por el modelo numérico.	94
FIGURA 5-15 Fisuración el panel EFNARC- DIANA FEA-4kg/m ³ . Vista en Planta	94
FIGURA 5-16 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-4kg/m ³ . Vista en Planta	95

FIGURA 5-17 Separacion de fisuras diagonalespara un EFNARC- DIANA FEA-4kg/m ³ . Vista en Frontal	95
FIGURA 5-18 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	96
FIGURA 5-19 MínimaTensión Principal S2. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA.....	97
FIGURA 5-20 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	97
FIGURA 5-21 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-8kg/m3.....	99
FIGURA 5-22 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-8kg/m3.....	99
FIGURA 5-23 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m ³ . Vista en Planta ..	100
FIGURA 5-24 Separacion de fisuras diagonalespara un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m ³ . Vista en Frontal	100
FIGURA 5-25 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	101
FIGURA 5-26 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	101
FIGURA 5-27 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-12kg/m3.....	103
FIGURA 5-28 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-12kg/m3..	103
FIGURA 5-29 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m ³ . Vista en Planta ..	104
FIGURA 5-30 Separacion de fisuras diagonalespara un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m ³ . Vista en Frontal	104
FIGURA 5-31 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	105
FIGURA 5-32 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA	105
FIGURA 5-33 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4-8-12kg/m3.	106
FIGURA 5-34 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4-8-12kg/m3.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Caracterización de las fibras Barchip	17
Tabla 2-2 Clasificación de la Tenacidad según “European Specification for Sprayed Concrete”	27
Tabla 2-3 Variables significativas que se miden en el EFNARC	27
Tabla 2-4 Modelos constitutivos propuesto por las diferentes normativas.....	40
Tabla 3-1 Dosificación del hormigón.	46
Tabla 3-2 Características de la fibra Barchip 54.....	47
Tabla 3-3 Distribución de probetas panel EFNARC-Barchip 54	47
Tabla 3-4 Valores de tensión residual, cuantía 4kg/m ³	49
Tabla 3-5 Valores de tensión residual, cuantía 8kg/m ³	51
Tabla 3-6 Valores de tensión residual, cuantía 12kg/m ³	53
Tabla 3-7 Valores de tensión residual de diseño, cuantías, 4- 8-12kg/m ³	54
Tabla 3-8 Distribución paneles EfNARC BARCHIP 54.....	57
Tabla 3-9 Carga Máxima de acuerdo EfNARC BARCHIP 54.....	58
Tabla 3-10 Energía Absorbida (J)- EfNARC BARCHIP 54	61
Tabla 3-11 Parámetros según fib Mode Code 2010- fck=42Mpa	64
Tabla 4-1 Propiedades lineales del material acero.....	71
Tabla 4-2 Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-4kg/m ³	72
Tabla 4-3 Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-8kg/m ³	73
Tabla 4-4 Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras12kg/m ³	73

Tabla 5-1 Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-4kg/m ³	87
Tabla 5-2 Comparación numérica-experimental Carga en función de la deformación Hormigón-4kg/m ³	89
Tabla 5-3 Comparación numérica-experimental Energía vs deformación Hormigón-4kg/m ³	91
Tabla 5-4 Ancho de Grieta medido en panel EFNARC- Hormigón-4kg/m ³	95
Tabla 5-5 Comparación numérica-experimental Carga vs Deformación y Energía vs Deformación Hormigón-8kg/m ³	98
Tabla 5-6 Comparación numérica-experimental Carga vs Deformación y Energía vs deformación Hormigón-12kg/m ³	102
Tabla 8-1 Propiedades lineales del material acero	118
Tabla 8-2 Parámetros según fib Mode Code 2010- fck=30Mpa	118
Tabla 8-3 Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-C30	119
Tabla 8-4 Máximo Tamaño de elemento	121

CAPITULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras se ha introducido fuertemente en la industria de la construcción, actualmente uno de sus principales usos es en hormigones proyectados o shotcrete reforzados con fibras, estos están siendo ampliamente utilizados con fines estructurales para el revestimiento y sostenimiento de túneles como en proyectos hidroeléctricos, mineros y civiles.

De ante mano se sabe que el hormigón ha sido uno de los materiales más usados en la construcción debido principalmente a su alta resistencia a la compresión, sin embargo, su comportamiento ante otros requerimientos como, tracción, flexión, corte, fisuración o tenacidad no son tan destacables y su capacidad de resistir cargas disminuye muy pronunciadamente cuando se fisura, es por esto que el hormigón ha sido reforzado con diferentes materiales, como las fibras, buscando mejorar su comportamiento otorgándole tenacidad y capacidad de resistir cargas una vez este ya ha fisurado.

Desde el punto de vista estructural, la utilización de HRFA permite que las secciones ofrezcan una capacidad resistente última mayor a la del hormigón en masa, este debe ser controlado mediante procedimientos experimentales, siendo uno de estos el Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC, que simula muy bien esta situación, al cargar un panel cuadrado apoyado sobre un borde también cuadrado, mediante una sección central de carga, este ensayo clasifica a los hormigones reforzados con fibras según la energía que absorben hasta una deflexión central de 25mm. Sin

embargo, este ensayo presenta varias complejidades en su ejecución, ya que requiere de elementos muy pesados, los cuales se realizan con el hormigón proyectado en terreno, siguiendo las recomendaciones dadas en "European Specification for Sprayed Concrete" publicado por EFNARC"

Ese documento trata de establecer las bases para la modelización del comportamiento de paneles del HRFA en un programa de elementos finitos DIANA FEA, así como de remarcar los puntos de especial atención para poder obtener unos resultados coherentes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo o numérico que simule el ensayo EFNARC suponiendo conocido el mecanismo de fallo y el comportamiento del material.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Calibrar el modelo con los múltiples datos de los ensayos que se disponen.
- ✓ Establecer las bases para la modelización del comportamiento del ensayo de panel EFNARC en un programa de elementos finitos.
- ✓ Evaluar la respuesta a tracción del HRF.

1.3 METODOLOGIA

Para el logro de los objetivos que se persigue el estudio mencionado, queda detallado los pasos a los que está estructurada la presente tesina.

En primer lugar, se realiza el estudio previo acerca de los conocimientos existentes sobre el hormigón reforzado con fibras y parámetros importantes del ensayo EFNARC, así mismo la recopilación de información que trata en mayor o menor grado de experimentos, artículos o publicaciones relacionados con la materia estudiada.

En segundo lugar, se exponen los resultados de ensayos experimentales que se han realizado para la caracterización de hormigones con distintas cantidades de fibras mediante el ensayo de vigas. En esta parte se analizan los resultados de interés del comportamiento tensional del hormigón reforzado en hormigones dosificados con 4-8 y 12kg/m³ de fibra. Caracterizado el material mediante el ensayo en vigas se establece los parámetros de partida para el posterior análisis en un panel EFNARC. El panel cuadrado de 600m x 600mx100m que según la EFNARC es el que representa de mejor manera este tipo de ensayo, se cuenta con una luz libre de 550 y sometido a una carga de 1.5mm/min hasta una deflexión central de 25mm.

El tercer aspecto es el desarrollo numérico, se ingresará en función de los datos recolectados, todas las características del ensayo experimental mediante análisis no lineal a un programa comercial de elementos finitos DIANA FEA, donde se introducirán las curvas constitutivas en función de la carga y la fisura, resistencia a tracción, compresión, energía de fractura etc.

Finalmente, se realiza un estudio del modelo numérico para validarlo con el modelo experimental, una vez validado se comparan ambos modelos en términos de su respuesta global..

CAPITULO 2.

ESTADO DEL ARTE

2.1 HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Según La nueva Instrucción de Hormigón estructural (EHE), se define al hormigón reforzado con fibras como aquel hormigón que incluye fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, en la proporción adecuada para mejorar una o varias de sus propiedades.[1]

La introducción de fibras de acero en el hormigón proporciona al material compuesto una elevada tenacidad una vez el hormigón ya ha superado su tensión máxima de tracción y ha fisurado. Dicho incremento se produce debido a la resistencia a tracción que ofrecen las fibras que están ancladas a cada uno de los lados de la fisura. [2]De esta forma, aunque la sección de hormigón esté fisurada, mantiene la capacidad de resistir tracciones, cumpliendo el propósito principal de limitar la apertura de fisuras, limitando su propagación y evitando que el material rompa.

El hormigón es un material frágil, por lo que su resistencia disminuye considerablemente cuando se produce las primeras fisuras, el objetivo principal de la adición de fibras al hormigón es mantener esa resistencia e incluso, según la cantidad y el tipo de fibra utilizada aumentarla. Desde el punto de vista estructural, la utilización de HRFA permite que las secciones ofrezcan una capacidad resistente última mayor a la del hormigón en masa al mismo tiempo que incrementan su capacidad de rotación seccional y, en consecuencia, su ductilidad.[3]

El hecho que el efecto de las fibras de acero se inicie una vez la sección de hormigón ha fisurado, obliga a dejar de lado los modelos de cálculo en los cuales se considera el material como lineal elástico y a utilizar programas de análisis no lineal material que permitan contemplar las peculiaridades del HRFA.

El estudio pormenorizado del comportamiento estructural de elementos complejos como pueden ser túneles, forjados, puentes, etc., requiere poder establecer donde el material empieza a fisurar, como colaboran las fibras a la hora de transmitir esfuerzos entre dicha fisura y como se redistribuyen los esfuerzos y se crean nuevas fisuras en la estructura para poder evaluar de forma lo más realista posible cuál es su capacidad última así como las condiciones en que se encuentra la estructura sometida a las acciones de servicio.[4]

2.1.1 Ventajas e inconvenientes de los HRFA

La implementación de fibras de acero en el hormigón produce una mejora en los siguientes aspectos:

2.1.1.1 Resistencia

Una de las ventajas destacables del uso de fibras en el hormigón es la mejora de su resistencia, puesto que, incorporando y distribuyendo las fibras de acero en una matriz de hormigón se puede reducir significativamente la fragilidad y con ello mejorar las propiedades mecánicas de éste. El HRFA al ser homogéneo e isotrópico, tiene igual rendimiento en todas las direcciones, que permite obtener un incremento importante de la tenacidad y una mayor resistencia a los efectos dinámicos, al impacto y atmosferas agresivas, como consecuencia de una mayor capacidad de absorción de energía. [5]

El HRFA conserva su resistencia en el proceso de deformación progresiva de la curva tensión-deformación; cuando se le somete al ensayo de flexión, se produce un notable incremento en la

absorción de energía (resistencia a la flexión). Por otro lado, se puede garantizar el comportamiento resistente, tanto elástico como plástico, de losas o soleras de hormigón sometidas a solicitaciones de cargas dinámicas, estáticas o concentradas. El HRFA puede soportar considerables deformaciones aún después de la formación de la primera fisura sin llegar al colapso de la losa, evitando así la rotura frágil. Esta reducción de la fisuración va acompañada de un incremento de la resistencia a la abrasión[6]. Una correcta distribución de las fibras de acero y su homogeneidad garantizan una mejor eficacia del refuerzo, así como una redistribución homogénea de las tensiones que se generan en la vida útil del hormigón. La repartición uniforme de las fibras en toda la estructura, es ideal para cargas sin punto de aplicación definida. [6]

2.1.1.2 Durabilidad

Una ventaja destacable del hormigón con fibras con respecto al hormigón armado es la mejora de la resistencia a la corrosión, esto se produce debido a que las fibras de acero distribuidas homogéneamente en el hormigón absorben gran parte de las tensiones internas que se originan, por lo tanto, existe un control en la formación de las fisuras de retracción plástica.[5]

2.1.1.3 Ventajas económicas:

Las ventajas económicas que presenta el uso de HRFA en la construcción son significativas debido al ahorro que se produce al evitar o disminuir la cuantía de armadura pasiva, también se puede ahorrar volumen de hormigón debido a que el espesor de los elementos se reduce, esto implica una disminución en la mano de obra, como resultado se tiene una preparación y mantenimiento más sencilla. El HRFA puede transportarse hasta el lugar de colocación, lo que implica ahorro en cintas transportadoras y bombeos. Por último, a largo plazo mejora la economía porque tiene una mayor resistencia al uso y al desgaste, lo cual reduce la necesidad de mantenimiento y renovación de forma significativa. [5]

En conclusión, la adicción de fibras de acero al hormigón produce los siguientes efectos:

- ✓ Aumento de la resistencia a tracción.
- ✓ Aumento de la resistencia a flexotracción.
- ✓ Ligero aumento de la resistencia al impacto.
- ✓ Aumento de la resistencia a la abrasión.
- ✓ Aumento de la resistencia a fatiga.
- ✓ Fisuración controlada.
- ✓ Disminución de las deformaciones bajo carga mantenida.
- ✓ Reducción de la fragilidad, aumentan la ductilidad.
- ✓ Mejoran la durabilidad.
- ✓ Aumentan la resistencia a temprana edad.
- ✓ Reducción de espesores de capa.
- ✓ Aplicación más simple y rápida.
- ✓ Eliminación de mallado.[6]

2.1.1.4 Inconvenientes

En obra se presenta la dificultad de conseguir una compacidad adecuada, lo que resulta un problema, el acabado de las superficies no es siempre liso lo que se traduce a problemas de rozamiento, se debe prestar especial atención porque es posible que el HRFA no de buenos resultados en el caso de que exista alteración o mala orientación de las fibras en el proceso de mezclado. Por último, cabe tener en cuenta la corrosión de las fibras. [5]

2.1.2 Aplicaciones generales del HRFA

Según las especificaciones de EFNARC, para el hormigón que se coloca neumáticamente sobre una superficie, clasifican al hormigón proyectado por su aplicación, las que pueden ser, estructural, apoyo a la roca y excavación, soporte de corto plazo y mejoras de superficie.

El hormigón proyectado hoy en día juega un papel importante en la industria de la construcción civil y minera, el uso de HRFA se va intensificando cada vez más y son diversas sus aplicaciones, es un material versátil, que puede ser fácil y rápidamente transformable como medio rentable para la construcción.[3]

Entre las formas de aplicación más frecuente del HRFA destaca el hormigón proyectado para el revestimiento de túneles, estabilización de taludes en superficies irregulares pues el hormigón proyectado reforzado con fibras se adapta a todos los relieves del terreno a revertir. Este método supone el ahorro en cuanto a materiales se refiere dejando de lado la malla electrosoldada obteniendo un ahorro económico, técnico y temporal. También es frecuente su uso en tubos para saneamiento o en la prefabricación, para controlar la fisuración con armadura complementaria a la armadura principal de la estructura pretensada.[7]

El hormigón proyectado es una forma eficiente de colocación de hormigón y posee excelente adherencia a múltiples sustratos, incluyendo roca, hormigón, albañilería y acero. Se adapta a diferentes aplicaciones en soporte de suelo, revestimientos y edificación pavimentación de carreteras y aeropuertos, por su resistencia al impacto y atmosferas agresivas. También lo encontramos en juntas de expansión de tableros de puentes, presas, recubrimiento de zanjas y tanques de almacenamiento de líquidos [6]

Las ventajas en comparación con el hormigón moldeado son muchas, por ejemplo, la colocación y compactación se efectúan en una sola etapa, no se necesita moldajes, permite un rápido proceso de colocación y puesta en marcha acortando los ciclos de trabajo.[7]

Hoy en día los hormigones reforzados han alcanzado una cierta madurez, colocándose actualmente en obra gran cantidad de metros cúbicos al año, tras su aplicación y periodo inicial de fraguado y rigidizarían el hormigón proyectado proporciona un soporte pasivo temprano al terreno, el hormigón proyectado, correctamente diseñado y aplicado permanece en su lugar sin hundimiento inclusive en paredes verticales o aplicaciones sobre cabeza. También es conveniente su uso en zonas de acceso limitado, usando equipos operados remotamente o tele-comandados, esto generalmente en aplicaciones subterráneas, permitiendo así una operación segura y manteniendo alejado al operador de la zona sin fortificar.[7] Estas ventajas han dado lugar a que el hormigón proyectado sea usado cada vez más, en resumen, el HRFA es utilizado en:

- a) **Pavimentos:** En este tipo de elementos la resistencia a flexotracción es fundamental. Las fibras tienen la ventaja, como se ha descrito anteriormente, de evitar la realización de juntas. También, se utilizan para reforzar pavimentos deteriorados colocando una capa de 4 o 5 cm de HRFA.
- b) **Túneles:** el hormigón proyectado puede ser utilizado con revestimiento final o soporte temporal, en revestimientos finales puede ser usado con la combinación de pernos de anclajes, cables, hormigón con fibras y marcos de acero, los espesores varían entre 50mmm hasta 5000mm, pudiendo ser aplicados en múltiples capas, empleo de su uso tenemos: gunita (ferrocarriles metropolitanos: metro de Bilbao; ferroviarios: AVE); carreteros (túnel de Somport en Aragón); minas (hullera Vasco Leonesa en León); dovelas (metro de Nápoles y L9 del metro de Barcelona). Se puede mejorar el desempeño de las capas de hormigón

proyectado con un aumento de los espesores de las capas aplicadas y/o con un incremento de la dosis de fibra. Por lo tanto, un mismo sistema de aplicación puede hacer frente a una serie de diferentes requisitos de diseño. Hoy en día, en las faenas subterráneas de la gran minería y obras civiles, se utiliza una combinación de hormigón proyectado, fibras, mallas y pernos de anclaje.[7]

- c) **Edificación:** el hormigón proyectado tiene gran aplicación en la construcción de edificios en los muros estructurales subterráneos formando parte de los elementos resistentes , también utilizado para la restauración y reforzamiento en la rehabilitación de estructuras dañadas en Cataluña se han rehabilitado forjados de naves industriales y otro en Alemania a base de HRFA pretensado(Martínez, n.d.)
- d) **Estructuras civiles:** el hormigón proyectado es muy eficiente en estructuras con geometrías complejas, incluyendo reducción de sección o secciones curvas. En canales, embalses y aliviaderos, pueden ser contruidos excavando hasta la forma requerida y luego proyectando hormigón directamente sobre el suelo o roca expuesta, se usa para relleno de hundimiento o superficies sobre-escavadas. También son utilizados en acabados decorativo, el hormigón proyectado es muy adecuado para generar formas libres con un acabado que puede ser realizado en situ.[7]
- e) **Protección contra el fuego:** el uso del hormigón proyectado como material para la protección contra el fuego es común, y puede ser una excelente solución especialmente en plantas químicas y refinerías. Este proceso puede incluir el revestimiento de estructuras de acero o un incremento en los espesores del hormigón de recubrimiento.
- f) **Estructuras contra explosiones:** El hormigón proyectado ha sido usado por la industria militar para construir hangares e instalaciones a prueba de bombas.[7]

2.2 HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO

El material que compone el hormigón proyectado deben cumplir las especificaciones suficientes para poder conseguir la resistencia necesaria, durabilidad, impermeabilidad, adherencia y trabajabilidad que requiera el diseño, los hormigones con fibras están formados principalmente por un conglomerante hidráulico, generalmente cemento portland, áridos finos y gruesos, agua y fibras de acero.

2.2.1 Cemento

En España el cemento está regulado por la Instrucción para Recepción de Cementos, RC-08 y las Normas UNE, concordantes con la Norma europea EN 197.

El cemento es el componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente en las características mecánicas del hormigón endurecido; para la dosificación se puede emplear cualquier cemento que cumpla los requisitos de un hormigón tradicional, siempre y cuando este cumpla con las características que exige el proyecto, este se define por sus características físicas y químicas.[8]

El Clinker es el constituyente más importante del cemento pues es determinante en el comportamiento del hormigón proyectado en el proceso de puesta en obra, favorece al fraguado rápido y, en el caso de emplear aditivos acelerante de fraguado, poder obtener una reacción inmediata. [9]Es importante tener en cuenta que mientras mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del árido, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta.[10]

Para la fabricación de hormigón proyectado, la Instrucción de Recepción de Cementos RC-08 recomienda el empleo de cementos tipo CEM I ó CEM II/L , con una categoría resistente mínima DE 42.5MPa, DE CLASE N ó R, sin embargo para aplicaciones especiales se puede emplear otros

tipos de cemento que se adapten de forma adecuada a las particularidades de dicha aplicación, dado que, puede ser necesario el uso de cementos resistente a sulfatos (SR) o resistentes al agua de mar (MR), siempre y cuando cumplan con lo especificado en las normas UNE E 80303. Para estructuras permanentes, las condiciones ambientales a las cuales se expone el hormigón proyectado debe estar regulado de acuerdo a la Norma EN 206-1, también debe considerarse las precauciones a las reacciones álcali-sílice de acuerdo a la norma EN 206-1.[10]

2.2.2 Áridos

Los áridos según su naturaleza pueden ser naturales procedentes del machaqueo o artificiales; estos deben de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza, establecidas en las normas:

- ✓ UNE EN 12620 (Para áridos pesados)
- ✓ UNE EN 13055-1 (Para áridos ligeros)

Los áridos son sumamente importantes en la mezcla, debido a que conforman la mayor parte de la masa del hormigón, lo que determina en gran parte su comportamiento, estos deben tener una granulometría continua, se puede emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros, ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados.[11]

Es aconsejable cuando se adicionan fibras de acero incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras puesto que cuando mayor sea la proporción de árido grueso y del tamaño máximo del árido menor será la movilidad potencial de la fibra. Se plantea que el valor óptimo de tamaño máximo de árido sea inferior a la mitad de la longitud de la fibra, entonces el tamaño máximo de los áridos para el uso de hormigón proyectado será de 12mm. Se recomienda también que el tamaño del árido no supere

$\frac{2}{3}$ de la longitud máxima de la fibra o $\frac{1}{5}$ del lado menor del elemento y $\frac{3}{4}$ de la distancia libre entre barras de armado. [4]

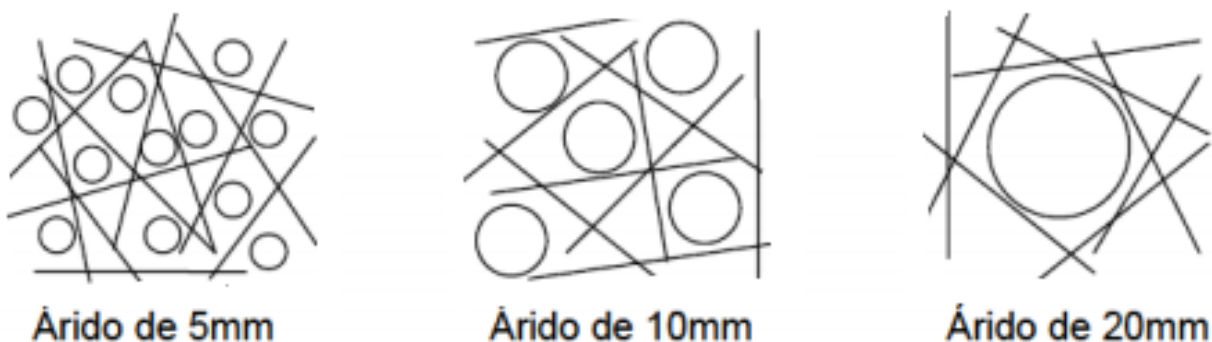


FIGURA 2-1 Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras mm de longitud) Fuente:(Hannat,1978)

Los factores importantes a considerar en los áridos son los siguientes:

- ✓ Distribución granulometría del árido y su composición.
- ✓ Humedad natural y absorción de humedad de los áridos.
- ✓ Coeficiente de desgaste de los áridos.
- ✓ Coeficiente de forma de los áridos.
- ✓ Se deberá comprobar las reacciones químicas de los áridos en uso como las reacciones álcali-árido y la existencia de conglomerantes hidráulicos latentes [10]

2.2.3 Agua

El agua en el mezclado debe cumplir la norma UNE EN 1008. Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de los hormigones tradicionales, las características del agua en la mezcla del hormigón proyectado pueden influir en los tiempos de fraguado, el desarrollo de resistencias del hormigón, la consistencia y en agentes que puedan afectar las fibras.

La instrucción EHE 2008, establece, en el Anejo 14, que el aumento de la consistencia debido al uso de fibras debe ser compensado siempre con adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de la misma. [11]

Debido al uso de al uso de fibras metálicas, deben ser controlados los siguientes parámetros en el agua a fin de garantizar su correcto uso.

- ✓ Exponente de hidrógeno pH (UNE 83952) >5
- ✓ Sustancias disueltas (UNE 83957) <15 gramos por litro
- ✓ Sulfatos, (UNE 83956) excepto para SR que será de 5g/l <1 gramo por litro
- ✓ Ión cloruro (UNE 7178) < 3gramos por litro
- ✓ Hidratos de carbono (UNE 7132) =0
- ✓ Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235) <15 gramos por litro

Para que el agua no tenga componentes con contenido orgánico que puedan ser perjudiciales al hormigón proyectado será necesario comprobar la compatibilidad con los aditivos antes de la fabricación y puesta en obra.[10]

2.2.4 Fibras de acero

Las fibras de acero son elementos de pequeña sección y corta longitud que se agregan a la masa del hormigón y que le confieren determinadas propiedades específicas bien sea en estado fresco, en primeras edades o endurecido, estas podrían ser clasificadas según su contribución a la estructura donde se distingue:

Fibras estructurales o microfibras son aquéllas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa aumentando la ductilidad y tenacidad; la naturaleza de la fibra, el tipo y las características geométrías juega un papel importante en la efectividad como refuerzo y transmisión de cargas. (En el caso de las fibras estructurales, la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón).[3]

Fibras no estructurales son aquellas que, sin considerar en el cálculo de energía de rotura, suponen una mejora ante determinadas propiedades como control de fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.[3]

La efectividad del refuerzo matriz-fibras exige a las fibras las siguientes propiedades:

- ✓ Resistencia a tracción significativamente mayor que el hormigón.
- ✓ Adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- ✓ Módulo de elasticidad mayor al hormigón. [11]

Los principales parámetros empleados para describir las fibras geoméricamente son la forma de la fibra, longitud de la fibra en mm (l_f), diámetro o diámetro equivalente de la fibra en mm (d_f). El cociente entre estos dos constituye la esbeltez o relación de aspecto de la fibra ($l/d_f = \lambda$) y el Área de la sección transversal de la fibra en mm² (A_t).

Además de las características geométricas también se especifican la resistencia a tracción de la fibra en N/mm² (R_m) y características de espacio como recubrimiento, espesor y espacio en barras de armado en el elemento si es el caso y por último la forma del suministro sueltas o en peines.[11]

Las fibras usadas para la fabricación del HRF pueden tener formas variadas, se puede encontrar rectas, onduladas, corrugadas, dentadas, con extremos conformados entre otras. Con respecto a la sección se encuentran circulares, rectangulares, cuadradas y planas como se muestra a continuación.:



FIGURA 2-2 Tipos de sección de fibras Fuente Sustitución del hormigón armado por hrfa en forjados convencionales de edificación.[4]



FIGURA 2-3 Formas geométricas de las fibras Fuente: Sustitución del hormigón armado por HRFA en forjados convencionales de edificación. [4]

En conclusión, as fibras de acero en todas sus variantes son las más utilizadas para conseguir hormigones con mejor resistencia a flexión, tracción, impacto, fatiga, etc. El presente trabajo se centra en el hormigón reforzado con fibras de acero HRFA, por esta razón se realiza un apartado específico de fibras de acero sintéticas Barchip que fueron utilizadas en los ensayos de laboratorio.

2.2.5 Fibras sintéticas Barchip

Las fibras sintéticas Barchip 48 y Barchip 54 es una fibra estructural de última generación de EPC (elasto plastic concrete) consideradas como Macro-fibras (basadas en la Norma EN14889-1 y 2 y la norma ASTM C1116-03), las cuales aportan capacidad de absorción de energía al hormigón después de la fisura al deformarse dúctilmente, estas son dosificadas por kg/m^3 o volumen (%) dentro de la masa de hormigón.[12]



FIGURA 2-4 Tipo de fibras sintéticas. Fuente [12]

Los beneficios de utilizar este tipo de fibra, según fabricante:


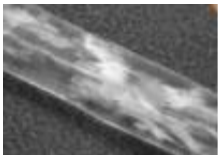
- ✓ Tenacidad a la flexión igual al acero
- ✓ No afecta negativamente las técnicas de acabado.
- ✓ La durabilidad es a largo plazo - libre de corrosión

- ✓ Más seguro y más ligero que el acero para manejar
- ✓ Reducción del desgaste en las bombas y mangueras de hormigón
- ✓ No reduce el asentamiento del hormigón
- ✓ Aumenta la ductilidad a la flexión del hormigón
- ✓ Aumenta la resistencia y capacidad de carga de la matriz frágil del hormigón
- ✓ Aumenta la resistencia a la abrasión e impacto del hormigón
- ✓ Mejora el control de la fisuración del hormigón
- ✓ Reducen los costos versus el refuerzo mediante acero tradicional
- ✓ Aumentan la productividad y eficiencia
- ✓ Más bajo costo de fibra por joule (\$/Joule)
- ✓ Mayor resistencia residual por kilo de fibra [3]y [12]

Las características de las fibras Barchip se muestran en la Tabla 2-1a continuación:

Tabla 2-1

Caracterización de las fibras Barchip

CARACTERÍSTICAS	BARCHIP 48	BARCHIP 54
Resina	Olefina Modificada	Olefina Modificada
Largos	48 (mm)	54 (mm)
Resistencia a tracción	550 Mpa.	640 Mpa.
Superficie	Relieve Continuo	Relieve Continuo
Cantidad de Fibra	33.000 Fibras/Kg	37.000 Fibras/Kg
Densidad Relativa	0.90-0.92	0.90-0.92
Módulo de Elasticidad	10Gpa	10Gpa
Punto de fusión	150 C- 170 C	159 C- 179C
Físico		

Fuente: Equivalencia entre ensayo EFNARC y el ensayo de tracción indirecta por Doble Punzonamiento.

BarChip54 tiene una tasa de dosis regular de 4kg/m^3 a 6kg/m^3 . No obstante, la dosificación debe ser determinada en base al rendimiento que se espera en el estudio, es esta oportunidad se trabajara y analizara con 4kg/m^3 , 6kg/m^3 y 12kg/m^3 .

2.3 NORMATIVAS EXISTENTES REFERENTES AL HRFA

Durante años ha existido un desconocimiento latente sobre el hormigón reforzado con fibras debido a la ausencia de normativa. Este vacío normativo ha hecho que durante los últimos años el hormigón con fibras haya sido visto como un material no estructural.

Existen instrucciones que contienen información acerca del hormigón reforzado con fibras como:

- ✓ FIB Model Code, (Fédération Internationale du Béton): Federación Internacional del Hormigón Estructural,
- ✓ RILEM TC-162-TDF (2003): la Unión Internacional de Laboratorios y Expertos en Materiales de Construcción, Sistemas y Estructuras (RILEM, por su nombre en francés).
- ✓ Norma alemana DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton (1992/2001). La German Concrete Society en 1992 fue la primera normativa que se valía de una ecuación σ - ε para el diseño de HRFA.
- ✓ Norma italiana: CNR-DT 204 (2006): El Comité Nacional de Investigación Italiano publicó en 2006 unas recomendaciones para el diseño, ejecución y control de las estructuras de HRF (CNRDT 204/2006 [43]). Este documento propone dos relaciones para el comportamiento a tracción del HRF: el modelo elástico-lineal y el modelo rígido-plástico.
- ✓ Normativa española EHE-08: el marco normativo referente al hormigón reforzado con fibras se basa en las normas UNE. En ellas consta, la clasificación y definiciones de las

fibras para el refuerzo del hormigón, toma de muestras de hormigón fresco, fabricación de probetas para ensayos de laboratorio, rotura por compresión, determinación del índice de tenacidad a compresión, determinación del contenido de fibras, etc.

En el anejo 14 de la instrucción hormigón Estructural (EHE-08), establece recomendaciones para mejorar ciertas características ya sea en estado fresco, primeras edades o estado de endurecimiento, en hormigón que empleen fibras.[8] Por primera vez, se incorpora un anejo de hormigón con fibras que responde a un planteamiento de dar responsabilidad estructural a estos hormigones. A nivel internacional, el marco normativo de referencia son las Normativas Europeas. Algunas de ellas se mencionan a continuación:

- ✓ EN 14889-1: Fibras para hormigón- Parte 1: Fibras de acero – Definiciones, especificaciones y conformidad.
- ✓ EN 14889-2: Fibras para hormigón- Parte 2: Fibras poliméricas– Definiciones, especificaciones y conformidad.

En estas normativas se definen propiedades de las fibras tales como sus dimensiones y tolerancias, su resistencia a tracción, su módulo de elasticidad, su ductilidad, la mezcla con el hormigón, los efectos de las fibras en el hormigón (en cuanto a consistencia y resistencia), etc. [8]

2.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL HRFA

2.4.1 Resistencia a tracción

El efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de las fibras, se manifiesta en la resistencia a tracción post-fisura. En el diagrama tensión-deformación a tracción directa del HRFA, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre-fisura respecto de la de un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida el efecto de cosido entre los dos labios de la

fisura. La resistencia a tracción post-fisura, a su vez, afecta a muchas otras propiedades mecánicas como la adherencia, la resistencia a cortante, la fatiga, etc.[8]y[11]

2.4.2 Resistencia a flexión

El incremento de la resistencia a flexotracción al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción. Esto se debe al comportamiento dúctil del HRFA en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales.[11] Normalmente, se determina la resistencia a primera fisura, la resistencia a rotura por flexotracción y la resistencia residual a flexotracción. El incremento de la resistencia a primera fisura obtenido con la adición de fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del contenido de fibras, del tamaño y de la forma de éstas, por lo que resulta más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de, aditivos, humo de sílice, entre otros.[8]

La resistencia a rotura depende principalmente del volumen de fibras y de la esbeltez de éstas, logrando incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz, si se utilizan fibras de extremos conformados.

2.4.3 Resistencia al impacto

Una de las principales características del HRFA es su resistencia a los impactos por absorción de energía, siendo en este caso su resistencia de 3 a 10 veces la resistencia del hormigón en masa (ACI 544.4R-88, 2009). Además, el HRFA presenta una menor tendencia a la desfragmentación y el desprendimiento. Todo lo anterior se debe a la sensibilidad de la matriz, a la resistencia de las fibras al arrancamiento y a la deformación.[8]

2.4.4 Resistencia a la compresión

Es de común aceptación que la adición de fibras al hormigón no conlleva un incremento significativo de la resistencia del hormigón a compresión. En HRFA con fibras de esbeltez 45, 65 y 80, y volúmenes de fibras de 0.5%, 1.0% y 1.5% encontraron incrementos de la resistencia a compresión entre 4-19% respecto de hormigones idénticos sin fibras. En hormigones jóvenes la capacidad de mantener la carga máxima a compresión se incrementa significativamente con la adición de fibras, a medida que madura el hormigón este incremento se reduce y la capacidad de absorción de energía y la ductilidad se concentran principalmente en la región post-fisura. [11]

2.4.5 Tenacidad

Es una de las propiedades más importantes cuando se espera que la estructura esté sometida a deformaciones o desplazamiento importantes después del agrietamiento. La tenacidad puede evaluarse en términos de capacidad de absorción de energía, normalmente entre el inicio de la carga y una deflexión especificada en un ensayo de viga o panel y se determina como el área bajo la curva carga/deflexión para una probeta. [7] La curva carga-flecha depende principalmente de las dimensiones del elemento (ancho, alto y longitud), de la configuración de carga (punto medio o a tercios), del criterio de control del ensayo (carga, flecha, abertura de fisura, carrera de la prensa, etc.) y de la velocidad de carga. Los métodos de ensayo más utilizados evalúan la tenacidad mediante una flecha máxima establecida o con unos índices de tenacidad (I_t) en función de diferentes valores de flecha obtenidos como múltiplos de la flecha a primera fisura.[8]

El valor de los índices de tenacidad depende principalmente del contenido de fibras, del tipo y de la esbeltez de éstas y poco o nada de que la matriz sea hormigón o mortero, es decir, los índices reflejan principalmente el incremento de tenacidad debido a las fibras y no a cualquier otro

mecanismo como por ejemplo el incremento de la resistencia a primera fisura (ACI 544.4R-88, 2009).[11]

En Europa occidental, se utiliza la Norma Europea EN 14488-5 para paneles, conocidos como ensayos de paneles de EFNARC. Existe evidencia de correlaciones útiles entre los valores de tenacidad y absorción de energía usando los diversos métodos de ensayo, siempre que el espesor de las probetas sea el mismo. Los valores de tenacidad necesarios para un proyecto dependen de los requisitos de la aplicación de que se trate, de los valores y método de ensayo adecuado deben ser especificados por un ingeniero o experto geo-mecánico[7].

2.5 ENSAYO DE PANEL CUADRADO EFNARC, ABSORCIÓN DE ENERGÍA Y TENACIDAD

Para comprobar el comportamiento estructural del hormigón proyectado (shotcrete) reforzado con fibras en la construcción de un túnel, se ha desarrollado el ensayo EFNARC para paneles, es un ensayo de flexión, el cual nos permite conocer la resistencia residual del hormigón proyectado y la capacidad de absorción de energía de este. [7]

El ensayo de panel EFNARC para el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es el más común para el control de la tenacidad de los hormigones proyectados en obras de sostenimiento de túneles, pues simula con efectividad el comportamiento de un revestimiento de túnel bajo la presión de la roca alrededor de un perno de anclaje.[13]

En la Figura a continuación se observa el modo de actuar la presión de la roca en un punto de carga del panel. Este ensayo ha sido normalizado por el CEN en la norma UNE-EN 14488-5:2007 y también fue publicado en las recomendaciones de la EFNARC.

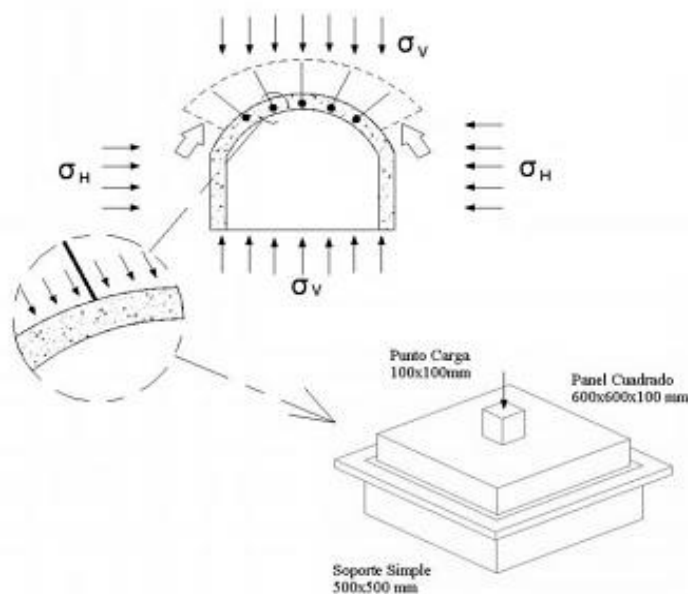


FIGURA 2-5 Modelo a escala del Ensayo de Panel Cuadrado EFNARC. Fuente:[14]

El ensayo descrito supone que el revestimiento de HRF se comporta como una losa; las dimensiones de los paneles de shotcrete reforzado con fibras de acero son 600 x 600 x 100 [mm], apoyados en sus cuatro bordes, dejando una luz libre entre bordes opuestos de 500 mm, los cuales para su elaboración deberán ser posicionados de forma vertical, donde se les proyectará el HRF, con el mismo equipo, técnica, espesor de capa por pasada, distancia de proyección, inmediatamente deberá ser protegido para evitar la pérdida de humedad, como si se hiciera en terreno. Para realizar el ensayo, el panel deberá ser apoyado en sus cuatro ejes y aplicar una carga en el centro, por la cara contraria a la cual se proyectó el hormigón, a través de una superficie de contacto de 100 x 100 [mm]. [12] y [7]

Las pruebas en laboratorio consisten en aplicar una carga puntual en el centro del panel cuadrado apoyado por los cuatro lados a una velocidad de 25 mm/s o 1,5 mm/min hasta alcanzar una deflexión de 25 mm. A partir de la curva de carga/deflexión, se extrae una segunda curva resultado de la absorción de energía (en Joules) en función a la deflexión del panel cuadrado [15].

Este método simula con fidelidad el comportamiento del revestimiento y proporciona una buena idea de la capacidad de carga y absorción de energía del shotcrete reforzado con fibras.[12] y [7]

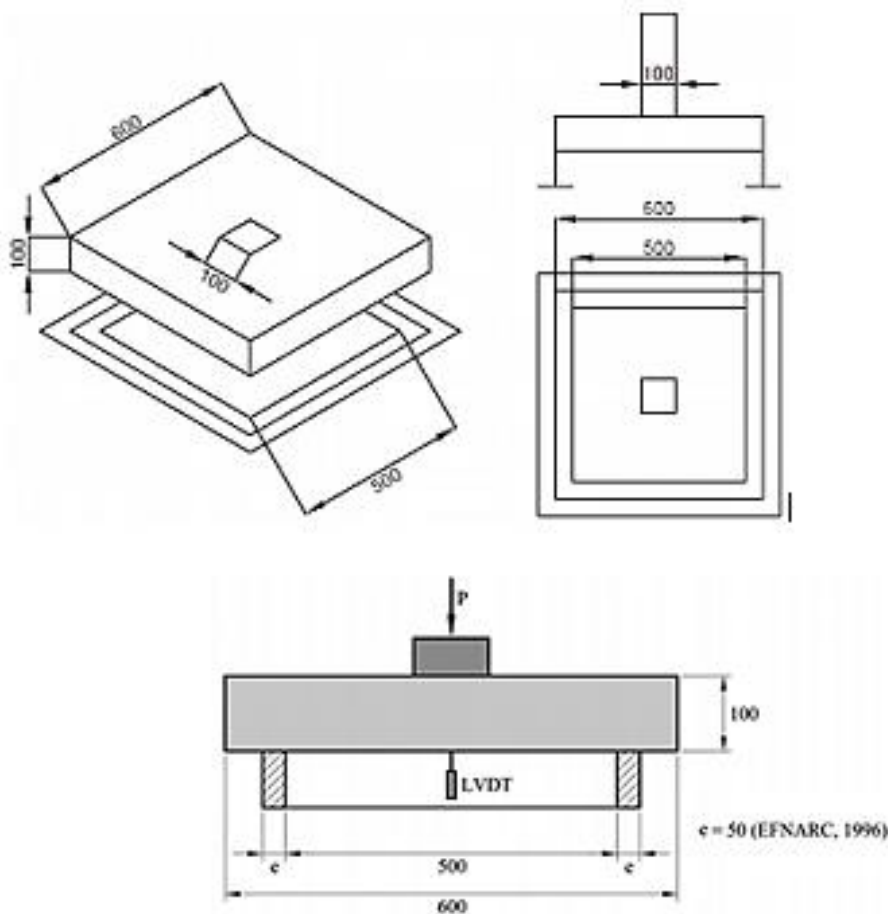


FIGURA 2-6 Diagrama de ensayo de panel EFNARC, medidas de apoyo y la carga central. Fuente: Use of Barcelona test for controlling energy absorption capacity of frs in tunneling [16]

La Energía es un parámetro que se calcula integrando el área que encierra la curva carga-desplazamiento. Mientras mayor sea la absorción de energía, más capaz será la mezcla de soportar una carga en el estado de fisuración. Una de las ventajas que presenta el panel EFNARC es la gran superficie de rotura que se obtiene al ensayar la muestra, este hecho hace que la dispersión de los resultados sea menor. [7]

2.5.1 Curva desplazamiento/carga

A partir de los datos que se obtiene de los ensayos, se puede obtener el espectro de comportamiento de panel ante un aumento constante de deflexión y la carga correspondiente a cada nivel de deflexión como se muestra en la Figura 2-7 hasta conseguir la deflexión de 25mm en el punto central del panel.

La tenacidad es el parámetro utilizado para calcular la capacidad del material de absorber energía, y es cuantificada como el área bajo la curva de la curva carga-flecha.

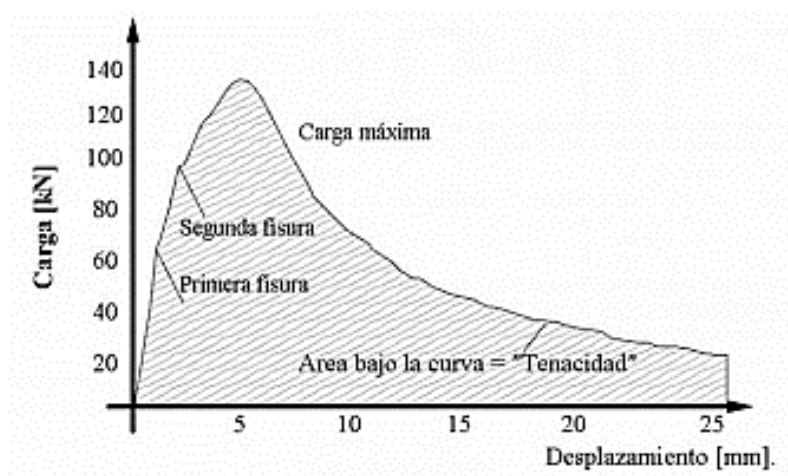


FIGURA 2-7 Grafico Tipo, Carga-Desplazamiento. Fuente: Caracterización de propiedades de hormigones con fibras sintéticas modificadas con polímeros [14]

La curva de Carga-Desplazamiento indica durante la prueba se han desarrollado numerosas fisuras. Una vez que se alcanza la carga máxima y se produce el efecto de redistribución de la carga máxima, las fibras comienzan a deformarse. En el grafico carga-desplazamiento el comportamiento se aprecia muy variable en sus inicios y en la zona cercana a la carga máxima, la carga máxima es un parámetro muy variable en un conjunto de ensayos, esta se presenta a diferentes niveles de deflexión y rodeada por un par o varios máximos locales. Es por esto que la carga máxima no es un parámetro tan importante como la energía que absorbe el panel hasta los 25 mm de deflexión central.[7]

2.5.2 Curva desplazamiento/Energía

La figura 2-7 descrita anteriormente donde se muestra la curva carga-deformación, se dibuja una segunda curva resultando la curva absorción de energía-deformación mediante la Ecuación (2-1) Este método intenta simular el comportamiento real del revestimiento de hormigón proyectado o “SOTCRETE”. [2] y [12]

$$E(\delta) = \int_0^{\delta} P(\delta) d(\delta) \quad (2-1)$$

Donde:

$P(\delta)$ corresponde a la carga en la deflexión δ .

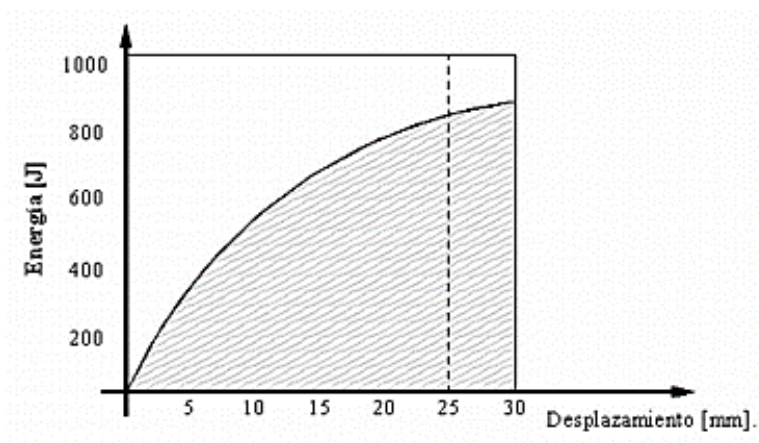


FIGURA 2-8 Grafico tipo, Energía-desplazamiento. Fuente: Caracterización de propiedades de hormigones con fibras sintéticas modificadas con polímeros [14]

2.5.3 Clasificación de la tenacidad EFNARC

La tenacidad según European Specification For Sprayed Concrete EFNARC, distinguen tres tipos A, B y C, según la energía absorbida para un desplazamiento de 25 mm en el centro de la probeta plana. La energía absorbida se mide en Joules. La Tabla 2-2 muestra la clasificación de Tenacidad con respecto a la energía de absorción obtenida del ensayo de Panel cuadrado EFNARC.

Tabla 2-2

Clasificación de la Tenacidad según “European Specification for Sprayed Concrete”

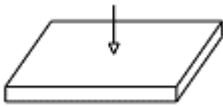
Clasificación de la Tenacidad	Absorción de energía hasta los 25mm de deflexión.
Clase A Solido en condiciones rocosas.	500Joule
Clase B Intermedio en condiciones rocosas.	700Joule
Clase C Difícil en condiciones rocosas.	1000Joule

Fuente: Equivalencia entre ensayo EFNARC y el ensayo de tracción indirecta por Doble Punzonamiento.

A continuación, se presenta se presenta en la Tabla 2-3 resumen de los aspectos significativos del ensayo EFNARC.

Tabla 2-3

Variables significativas que se miden en el EFNARC

Ensayo	Esquema	Variables Principales
Ensayo de panel EFNARC		✓ Tasa de deformación
		✓ Curva energía-deformación
		✓ Medida de la carga a primera fisura y carga máxima mantenida
		✓ Energía absorbida para una flecha central de 25mm
		✓ Dimensiones (cm) = 60*60*10
		✓ Volumen (cm ³) = 36.00
		✓ Peso (kg) = 86.40
		✓ Velocidad de carga (mm/min) = 1.5
		✓ Superficie rotura (cm ²)=2597.7
		✓ Superficie especifica de rotura (cm ²)=0.0722
		✓ C.V. (%) = 9

Fuente: Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras.[17]

2.5.4 Efecto de la fricción en los paneles-soporte

Durante la prueba de panel cuadrado EFNARC se debe tomar en cuenta el efecto potencial de la fricción. Cuando el panel gira para descender bajo la presión de la carga, tiende a separar las líneas de soporte iniciales. Dado que el marco de soporte es rígido horizontalmente, es necesario que fuerza horizontal supere la fuerza de fricción para que tenga lugar el movimiento[18]. La fuerza de fricción se puede calcular a partir del coeficiente de fricción (μ) entre el concreto del panel y el acero del marco de soporte al conocer la fuerza vertical. Según Rabbat y Russell (1985), se adoptó un coeficiente de 0,57.

La práctica supone que cuatro grietas perpendiculares se forman y que las grietas están orientados normales al soporte. Una evaluación teórica revela que el efecto de la fricción será algo menor para paneles cuadrados si las grietas están orientadas más cerca de las esquinas.[16]

En base a los ensayos realizados los resultados muestran que las condiciones de fricción entre el panel de hormigón y el soporte tiene un gran impacto sobre la absorción de energía. Para el caso denominado " estándar " condiciones, que es el normal de puesta a punto para las pruebas de panel, los resultados muestran que 35% de la absorción total de energía entre 0 y 25 mm de deflexión es debido a la fricción, y el 65% restante se debido a la acción de la fibra en el panel de hormigón, pero cuando se elimina la fricción , los resultados muestran en promedio, que la carga máxima durante la prueba se reduce en un 15% y la carga residual en 25 mm de deflexión se reduce en un 46%. para eliminar la fricción entre el panel y el soporte se utilizaron ganchos. Se supone que no hay fricción en estas pruebas, pero es probable que un pequeño componente de fricción este todavía presente, por tanto, es posible que el efecto de la fricción que se ha demostrado experimentalmente sea aún un poco subestimado.[16]

2.6 MODELIZACIÓN NUMÉRICA Y COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL HORMIGÓN CON FIBRAS.

2.6.1 Modelización numérica de los elementos

El comportamiento de las estructuras de hormigón es complejo, debido a los fenómenos propios de sus materiales, de su interacción y del proceso constructivo. Entre estos fenómenos se encuentran el carácter no lineal y frágil del comportamiento tensión-deformación del hormigón manifestado en la fisuración en tracción y curva tensión-deformación no lineal.

Para el diseño y evaluación de los elementos de hormigón con fibras, el análisis no lineal de elementos finitos se ha convertido en una herramienta importante, las simulaciones del comportamiento de estructuras de hormigón, usando métodos de elementos finitos no lineales tridimensionales, han mostrado una mayor capacidad de carga en comparación con los análisis convencionales. Esto puede explicarse por una distribución de la carga más favorable cuando se analiza la estructura en tres dimensiones y debido a que la energía de fractura asociada con la fisuración del hormigón está incluida.

El método de elementos finitos hace posible tener en cuenta la respuesta no lineal. Varios métodos de modelado se pueden utilizar dependiendo de la respuesta, Sin embargo, siempre es importante validar el método de modelado por los resultados de las pruebas y ser consciente de las limitaciones del modelo.

2.6.1.1 *Análisis y modelos lineales de hormigón*

Los modelos lineales y elásticos consideran al menos 4 hipótesis fundamentales que son: comportamiento elástico-lineal de los materiales, relación lineal entre desplazamientos y deformaciones, apoyos con comportamiento lineal y equilibrio en la configuración no deformada de la estructura.

El análisis lineal se pueden determinar los efectos originados por las acciones, tales como esfuerzos, reacciones, tensiones, deformaciones y desplazamientos. El análisis lineal presenta ventajas como la proporcionalidad de causa y efecto, se calcula con rigideces elásticas, un análisis conservador (del lado de la seguridad), calculo directo donde no se necesita iterar. [19]

Las limitaciones del análisis lineal son: no reproduce bien las deformaciones en servicio si hay fisuración, no reproduce la interacción entre el comportamiento no lineal de los materiales, los efectos de 2º orden y el comportamiento diferido, no proporciona una distribución de esfuerzos correcta (aunque en general es conservadora), no proporciona información muy rigurosa sobre el nivel de seguridad en estructuras hiperestáticas. Por ello, se desarrollaron diversos métodos de análisis que tratan de tener en cuenta el comportamiento no lineal.

2.6.1.2 *Análisis y modelos no-lineales de hormigón armado*

Las características esenciales de un modelo de análisis no lineal son:

- ✓ Considera diagramas tensión-deformación no lineales de los materiales, reproduciendo la fisuración y tensión- deformación, no linealidad en carga y descarga, plastificación, agotamiento, etc. [19]
- ✓ Idealiza la estructura en elementos y las secciones en fibras, cuyas propiedades irán variando en función del estado de los materiales o de la deformación de la estructura.
- ✓ Procede iterativamente, hasta que en cada sección se satisfacen las condiciones de equilibrio (entre cargas, esfuerzos y tensiones), compatibilidad (entre desplazamientos, deformaciones y coacciones de apoyo, y los diagramas s-e no lineales de los materiales.

2.6.2 Modelos de fisuración

Los programas de análisis estructural avanzado permiten considerar la fisuración de los materiales y el comportamiento post-fisuración en base a dos metodologías distintas de

modelización, la fisuración discreta (modelo discontinuo) y la fisuración distribuida (modelo discontinuo). El modelo de fisura discreta utiliza elementos finitos en el cual las fisuras en el hormigón están representadas por separado como límites. En el modelo de fisura distribuida, se supone que las fisuras en el hormigón se dispersan y distribuyen.[20]

2.6.2.1 Fisuración discreta

El enfoque de fisura discreta refleja la naturaleza local de la formación de grietas, por lo que la zona de proceso de fractura se agrupa en la línea de la grieta (banda de espesor nulo). Dentro de los modelos de fisuración discreta se pueden distinguir dos subdivisiones:

- ✓ Modelo de fisura no embebida, en los cuales se utilizan técnicas de remallado para hacer coincidir la discontinuidad con los lados de los elementos.
- ✓ Modelo de fisura embebida, aquellos que enriquecen el campo de desplazamientos (o deformaciones) para que la discontinuidad pueda atravesar los elementos finitos sin necesidad de hacer remallado. Los modelos de fisuración discreta se utilizan básicamente para representar la modelización de elementos masivos de hormigón (elementos sin armadura) donde la formulación considera que cada fisura se modela explícitamente e incorpora una discontinuidad en la malla. [19]

2.6.2.2 Fisuración distribuida

Este modelo describe la fisuración del hormigón cuando no existían macro-fisuras. Los modelos de fisuración distribuida están más que aceptados en elementos de hormigón y se ha comprobado que reproducen bastante la fisuración. [19]

Existen dos conceptos de fisuración distribuida en función cómo se trata numéricamente la fisuración del elemento: el concepto de modelos en los que superada la resistencia de tracción del elemento la deformación total se divide en una deformación elástica y otra deformación plástica o

de fisura (decomposed-strain Model), otro concepto en el que se asume que la tensión es una función de la deformación total (total strain crack model) desarrollado por Vecchio-Collins en 1993.

2.6.2.3 Concepto modelo fisuración deformación total (total strain crack models)

El modelo constitutivo basado en la tensión total se desarrolla en la línea de la Teoría del Campo de Compresión Modificada, originalmente propuesta por Vecchio & Collins, los modelos de grietas basados en tensión total siguen un enfoque basados en la energía de fractura. [21]

El modelo proporciona dos métodos tomando en cuenta la orientación de grieta: el modelo de fisura fija y el modelo de fisura rotante en función de los ejes de fisuración de referencia. El primero supone que los ejes de las fisuras permanecen sin cambios una vez que se definen los ejes de fisuración. Por el contrario, en el modelo de fisura rotante se supone que las direcciones de las fisuras giran continuamente en función de los cambios en los ejes principales de las deformaciones.[20]

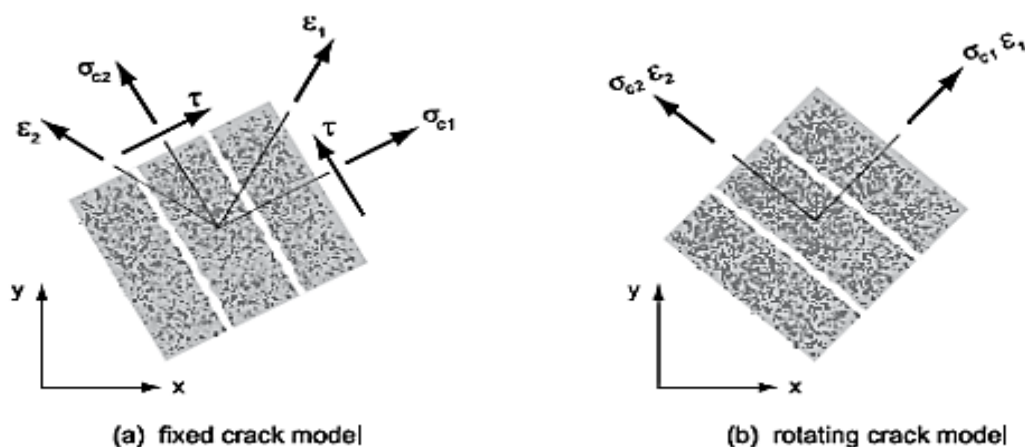


FIGURA 2-9 Modelos de fisuración ortogonal. Fuente: Comportamiento no lineal de vigas isostáticas de hormigón parcialmente pretensado.

Para el modelo mencionado Diana puede requerir el ancho de banda de la grieta. Diana ofrece tres métodos para determinar el ancho de banda de grieta. Por defecto, Diana asume un valor

relacionado con el área o el volumen del elemento según lo descrito por Rots. Puede anular el valor predeterminado utilizando el método de proyección de Govindjee para determinar el ancho de banda de grieta especificando explícitamente el ancho de banda de crack.[22]

- Método basado en elementos de Rots. [22] determina que el ancho de banda de la grieta dependiera del tamaño, la forma y la función de interpolación del elemento finito utilizado.
- Método de proyección de Govindjee. En el método considera la longitud proyectada del elemento que contiene la grieta en el plano de la grieta. Por lo tanto, además del tamaño del elemento, este método también tiene en cuenta la relación de aspecto del elemento y la orientación de la grieta.[23]
- Entrada directa, el usuario puede ingresar directamente el ancho de banda de crack.[20]

2.7 ECUACIONES CONSTITUTIVAS NO LINEALES DEL MATERIAL

El hormigón como material tiene un comportamiento no lineal tanto en compresión y en tensión. Para determinar el comportamiento de las estructuras de hormigón, es importante tomar en cuenta esta respuesta no lineal del material. Una forma de hacer esto es mediante el uso de modelos de materiales no lineales en el análisis de elementos finitos.[19]

2.7.1 Estudios de la ecuación constitutiva del HRFA

Los modelos constitutivos o modelos de material se utilizan dentro de un contexto de elementos finitos que especifican el comportamiento constitutivo que se supone para los materiales de la estructura, existen tres clases de modelos constitutivos: modelos continuos, modelos discretos y mixtos. En los modelos continuos se describe con una relación tensión–deformación, éstos modelos a menudo son simplificaciones aproximadas del verdadero comportamiento del material. Esta relación se basa comúnmente en la elasticidad, la plasticidad, el daño o el concepto fisura distribuida.[24]

Un modelo de plasticidad a menudo se describe el comportamiento no lineal en compresión. Por el lado de la tracción de un modelo de plasticidad, un modelo de daño o un modelo de fisura distribuida se utiliza a menudo para describir el comportamiento de la apertura de grietas. A diferencia de lo que ocurre a tracción, el comportamiento a compresión del HRF no dista de la respuesta del hormigón convencional. Es por ello que uno de los retos más importantes es el de desarrollar un modelo de ecuación constitutiva que permita caracterizar adecuadamente el comportamiento a tracción de dicho material. [17]

2.7.2 Modelos a compresión.

El hormigón sometido a tensiones de compresión muestra un comportamiento dependiente de la presión, es decir, la resistencia y la ductilidad aumentan con el aumento de la tensión isotrópica. Debido al confinamiento lateral, la relación de esfuerzo de compresión-deformación se modifica para incorporar los efectos del aumento del estrés isotrópico. Las curvas disponibles en los modelos predefinidos numéricamente son la curva constante y la curva frágil, y las curvas de softening lineales y exponenciales en base a la energía de fractura de compresión, G_c .

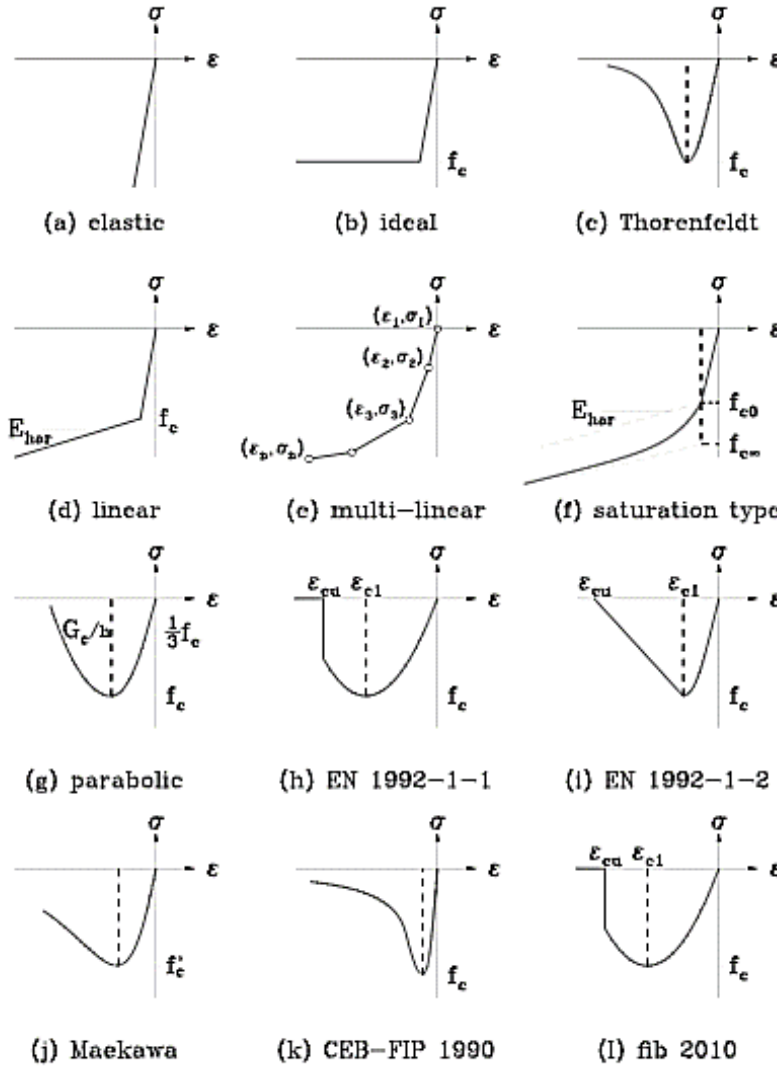


FIGURA 2-10 Modelos de Compresión. Fuente: DIANA-FEA[19]

2.7.3 Modelos tensión-ancho de fisura ($\sigma - \omega$) / Modelos tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$)

El concepto de fisuración distribuida fue desarrollado especialmente para la fisuración del hormigón bajo carga de tracción. Las dos ideas básicas de la mecánica de la fractura no lineales son que algunas tensiones de tracción se pueden transferir después de que se ha iniciado una microfisuración, y que este esfuerzo de tracción depende de la abertura de fisura en el lugar de la deformación FIGURA 2-11

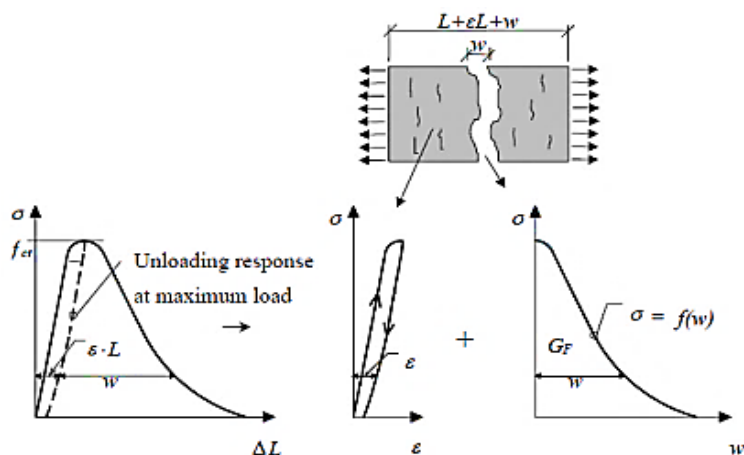


FIGURA 2-11 Relación esfuerzo-desplazamiento, ensayo uniaxial de tracción, subdivididos en una relación de tensión-deformación general y una relación de tensión-desplazamiento para las deformaciones locales. Fuente:[19]

El área bajo la curva de tensión-apertura de fisuras representa la energía que se consume o se disipó, durante el proceso de fractura. Esta energía denota la energía de fractura (G_f). Los parámetros materiales necesarios, además de la energía de fractura, para describir la formación de fisuras son la resistencia del hormigón a la tracción, f_{ct} , y la forma de la relación tensión-apertura de fisuras (ley de tracción-separación).[19]. La descripción del comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras puede realizarse, mediante la relación σ - ϵ relacionado con el concepto del modelo de la fisura ficticia (fictitious crack model) o la relación σ - ϵ y ambas representadas esquemáticamente en la FIGURA 2-12.

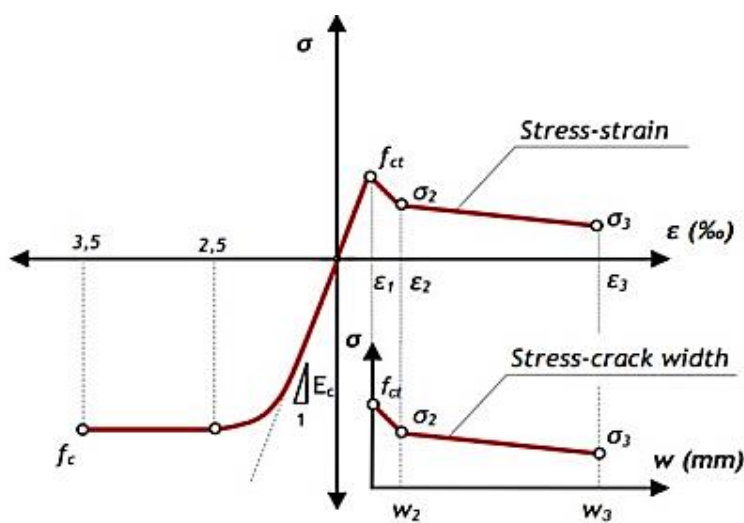


FIGURA 2-12 Diagrama constitutivo del comportamiento a compresión y tracción. Fuente:[17]

El diagrama σ - ϵ permite la definición del comportamiento a tracción del material en los mismos términos que el de compresión, conduciendo a un único diagrama para la representación del comportamiento del HRF. Asimismo, este tipo de diagrama resulta de especial interés por su compatibilidad con el del acero, permitiendo aplicar una metodología encaminada hacia la visión conjunta del material (HRF) como hormigón estructural. Por este motivo, se introduce el concepto de longitud característica (lcs) que permite establecer una relación entre el ancho de fisura y la deformación del material.

$$w=f(\epsilon, lcs) \quad (2-2)$$

Existen numerosas propuestas para tratar de evaluar dicha longitud, sin embargo, la clara dependencia tanto de las condiciones de ensayo como de la geometría del elemento ensayado dificultan enormemente su determinación.

El modelo de total strain crack materializa la función de softening basado en la energía de fractura. Los modelos basados en esta función son: curva de softening lineal y exponencial, y la curva de softening no lineal sugerida por Hordijk. En el caso de un modelo de fisura distribuida, estos modelos tienen una relación con el ancho de banda de fisura. Por su parte hay un comportamiento a tracción, que no tiene un efecto directo sobre la energía de fractura. Este comportamiento puede ser representado en el concepto de deformación total. Los modelos que pertenecen a este grupo se definen como, el ideal multi-lineal y brittle como se muestra en la FIGURA 2-13.

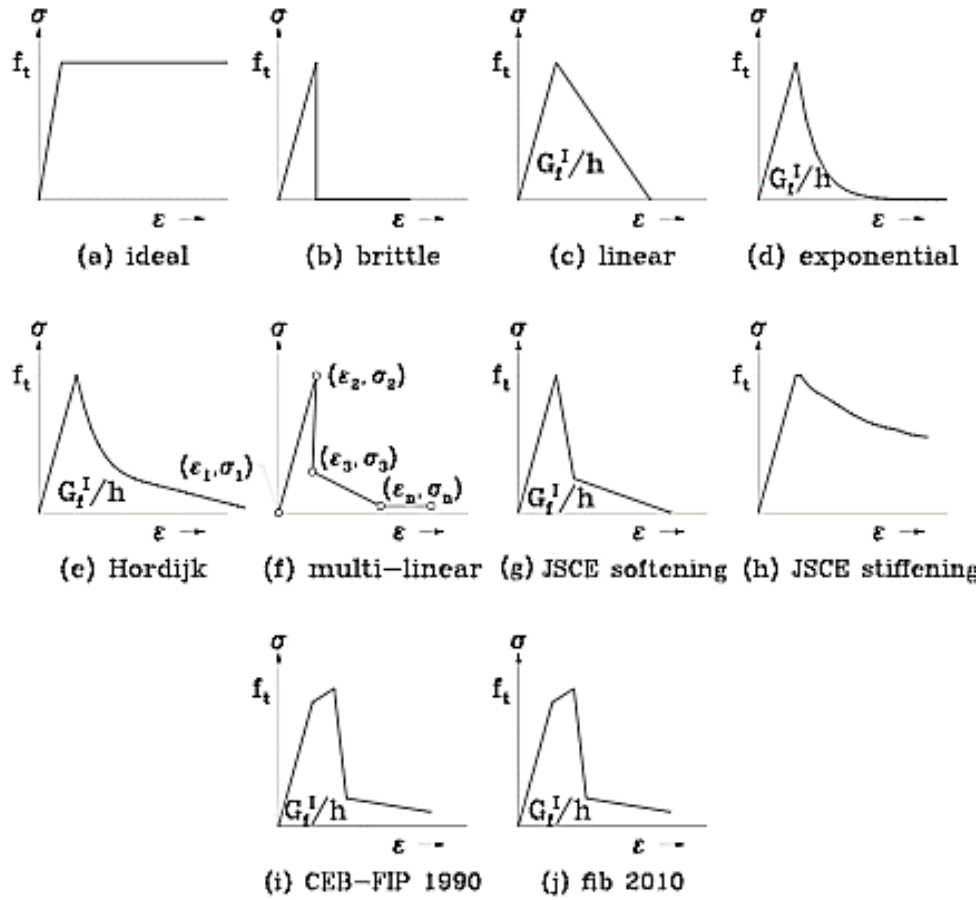


FIGURA 2-13 Modelos de Tensión. Fuente: DIANA-FEA[19]

2.7.3.1 Ecuaciones constitutivas propuestas en la literatura técnica

No existe aún un modelo constitutivo relativo al comportamiento a tracción del HRF que se imponga sobre los demás. Este hecho ha conducido a la aparición de numerosas propuestas, recogidas en la literatura técnica, algunas de las cuales se presentan a continuación.

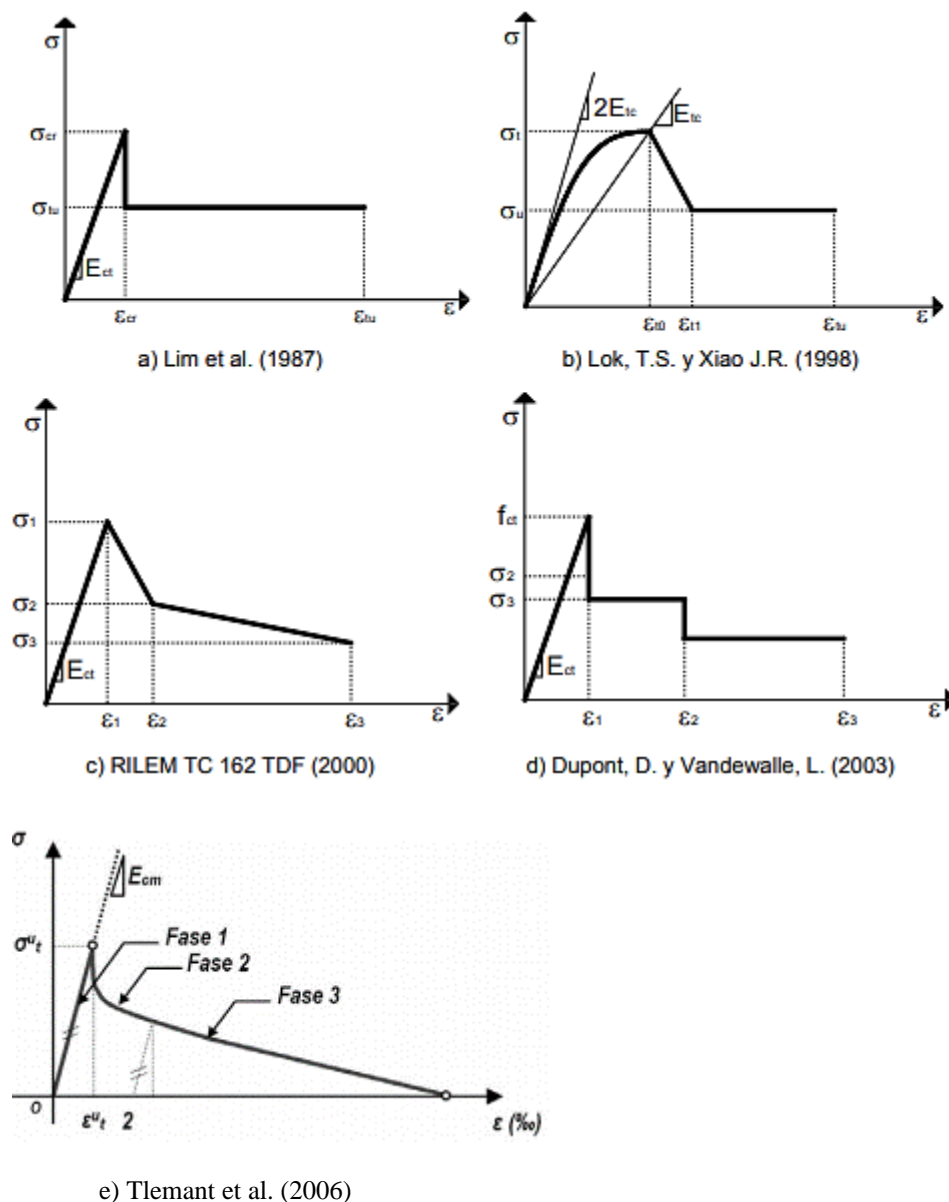


FIGURA 2-14 : Ecuaciones $\sigma - \varepsilon$ para el HRFA propuestas en la literatura. Tensión-Deformación. Fuente:[17]

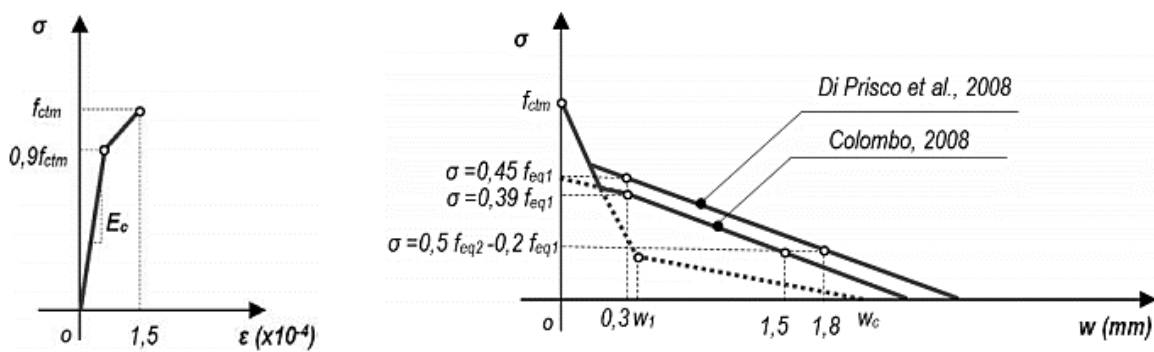
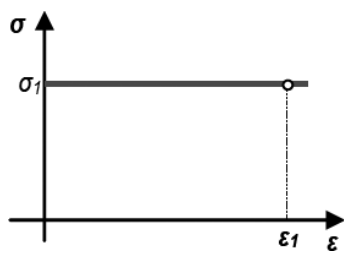
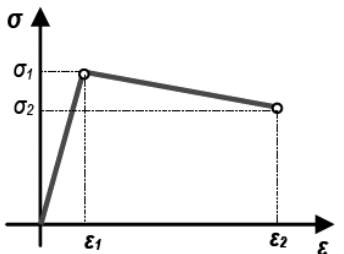


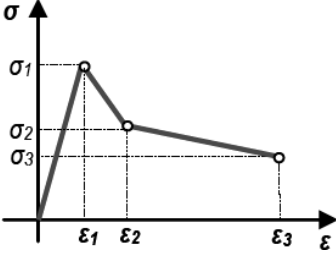
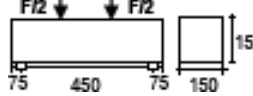
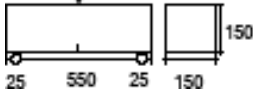
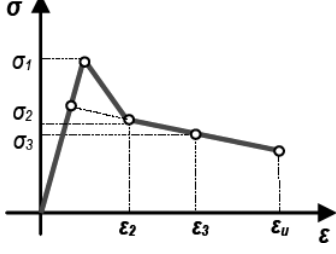
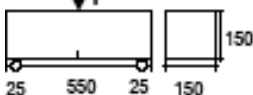
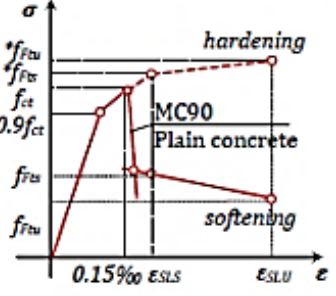
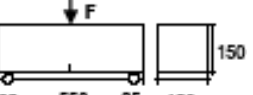
FIGURA 2-15 Ecuaciones $\sigma - \varepsilon$ para el HRFA propuestas en la literatura. Tensión-Ancho de fisura. Fuente:[17]

Los modelos constitutivos presentados en Tabla 2-4 Tabla 2-4 que proponen los diagramas rectangulares y matrilineales de diversas normativas.

Tabla 2-4

Modelos constitutivos propuesto por las diferentes normativas

Diagrama	Parámetros	Ensayo	
	$\sigma_1 = f_{ctRd} = 0,33f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ flexión}; 10\% \text{ tracción}]$	3-point bending test. UNE EN 14651	EHE
	$\sigma_1 = f_{Ftu} = f_{eq2}/3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ reblandecimiento}; 10\% \text{ endurecimiento}]$	4-point bending test. UNI 11039	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys}^f / \alpha^f \leq f_{eq'ctd,I}^{ct}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test. NBN B 15-238	DBV
	$\sigma_1 = f_{eq'ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys}^f / \gamma^f$ $\sigma_2 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys}^f / \gamma^f \leq f_{eq'ctd,I}^{ct}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test. NBN B 15-238	DBV
	$\sigma_1 = f_{Fts} = 0,45f_{eq1}$ $\sigma_2 = f_{Ftu} = k[f_{Fts} - (w_u/w_{i2})(f_{Fts} - 0,5f_{eq2} + 0,2f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ tracción pura}, 1 \text{ resto de casos}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ reblandecimiento}; 10\% \text{ endurecimiento}]$	4-point bending test. UNI 11039	CNR-DT 204

	$\sigma_1 = f_{ctd} = \alpha^f \hat{\alpha} f_{ctk,fl} / \gamma^f$ $\sigma_2 = f_{eq'ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \hat{\alpha} \alpha_c^f \hat{\alpha} \alpha_{sys}^{sys} / \gamma^f$ $\sigma_3 = f_{eq'ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \hat{\alpha} \alpha_c^f \hat{\alpha} \alpha_{sys}^{sys} / \gamma^f$ $\leq f_{eq'ctd,I}^{ct}$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1\%$ $\varepsilon_3 = \varepsilon_u = 10\%$	<p>4-point bending test. NBN B 15-238</p>  <p>DBV</p>
	$\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \hat{\alpha} K_h \hat{\alpha} f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \hat{\alpha} K_h \hat{\alpha} f_{R,4}$ $\varepsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRF}$ $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0,1\%$ $\varepsilon_3 = \varepsilon_u = 25\%$	<p>3-point bending test. RILEM TEST</p>  <p>RILEM</p>
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\varepsilon_2 = 0,1 + 1000 \hat{\alpha} f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\varepsilon_3 = 2,5 / l_{cs} = (l_{cs}: \text{long. crítica})$ $\varepsilon_u = [20\% \text{ flexión}; 10\% \text{ tracción}]$	<p>3-point bending test. UNE EN 14651</p>  <p>EHE</p>
	$f_{ctm} = 0,3 (f_{ck})^{2/3}$ $f_{Fts} = 0,45 f_{R1}$ $f_{Ftu} = k (f_{Fts} - (W_u / CMOD_3))$ $(f_{Fts} - 0,5 f_{R3} + 0,2 f_{R1})$ $\varepsilon_{SLS} = CMOD_1 / l_{cs}$ $\varepsilon_{SLU} = w_u / l_{cs} = \min (\varepsilon_{Fu}, 2,5 / l_{cs})$ $= 2,5 / y)$ $\varepsilon_{Fu} = [20\% \text{ reblandecimiento}; 10\% \text{ endurecimiento}]$	<p>3-point bending test. UNE EN 14651</p>  <p>EHE</p>

Fuente: Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras.[17]

Con respecto al comportamiento en tensión, según el fib Model Code 2010, que es el aspecto más importante de FRC, son posibles varios métodos de prueba. Las pruebas de flexión se pueden llevar a cabo con el objetivo de determinar la relación de desviación de carga. Los resultados se pueden usar para derivar las relaciones de ancho de grietas de tensión mediante análisis inverso, realizando cálculos de equilibrio para numerosas aberturas de grietas.[25]

Los valores nominales de las propiedades del material se pueden determinar realizando una prueba de flexión de tres puntos en una viga dentada de acuerdo con la norma EN 14651. Este ensayo se denomina CMOD (Crack Mouth Opening Displacement). FIGURA 2-16

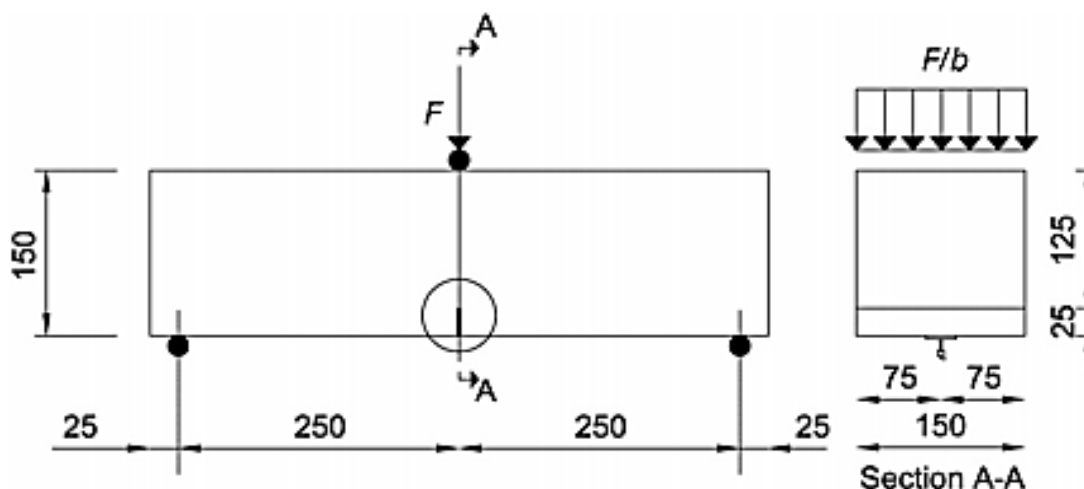


FIGURA 2-16 Configuración de prueba requerida en EN 14651 (Dimensiones en mm). Fuente: fib Model Code[25]

Los parámetros, f_{Rj} , que representan la tensión de flexión residual, se evalúan a partir de la relación F-CMOD, de la siguiente manera:

$$A = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (2-3)$$

Donde:

- ✓ f_{Rj} [MPa] es la resistencia a la tracción a la flexión residual correspondiente a $CMOD = CMOD_j$;
- ✓ F_j [N] es la carga correspondiente a $CMOD = CMOD_j$;
- ✓ l [mm] es la longitud del tramo;
- ✓ b [mm] es el ancho de la muestra;
- ✓ h_{sp} [mm] es la distancia entre la punta de la entalla y la parte superior de la muestra (125 mm)

Se debe generar el diagrama de la fuerza aplicada (F) versus la deformación

FIGURA 2-17. La deformación generalmente se expresa en términos de desplazamiento de apertura de boca de grieta (CMOD). De esta forma se pueden obtener para diferentes aberturas de fisura sus flechas asociadas en la sección central. Normalmente, se obtienen cuatro resistencias residuales a flexión, correspondientes a aberturas de fisura de 0,5 mm, 1,5 mm, 2,5 mm, y 3,5 mm asociadas a las cargas F_1 , F_2 , F_3 , y F_4 . A partir de los valores medidos de esas cargas se determinan las resistencias residuales a flexión.[4].El diagrama carga aplicada-CMOD que se obtiene en los ensayos de laboratorio tiene la forma que muestra a continuación.:

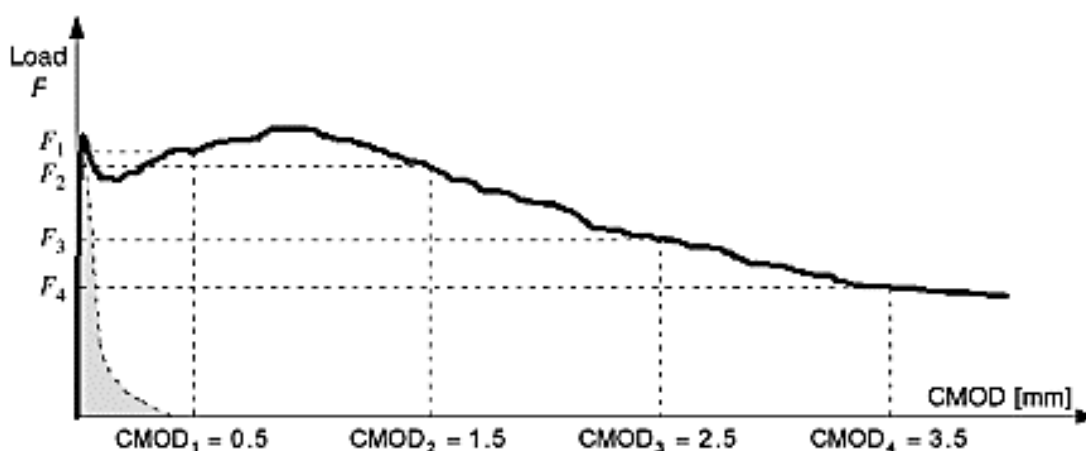


FIGURA 2-17 Curva típica de carga F – CMOD para hormigón plano y FRC. Fuente: fib Model Code[25]

CAPITULO 3.

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se manifestó en el estado del arte, actualmente no se cuenta con un método específico que determine el comportamiento real del hormigón con fibras, en este caso el objetivo es analizar el comportamiento del panel EFNARC, por esta razón se plantea la descripción de pruebas en vigas realizadas en la Universidad Técnica Federico Santa Maria dentro del Departamento de Obras Civiles en Valparaíso-Chile para la caracterización del material, del mismo modo se cuenta con ensayos en paneles con los que posteriormente se comprará los resultados en función de carga-desplamamiento. Las pruebas realizadas en vigas como se observa en la FIGURA 3-4, FIGURA 3-6 y FIGURA 3-9 permiten definir datos de interés referentes al programa experimental desarrollado.

En este capítulo se exponen aspectos generales de las vigas ensayadas de igual manera se cuenta con información referente al panel estudiado, entre los cuales se mencionan la geometría, materiales, tipo de fibra, y sobre todo nos permite conocer el comportamiento tensional tanto a tracción como a compresión, básicamente se realizó un análisis en rotura de los paneles reforzados con fibras Barchip 54, donde el hormigón fisura tomando en cuenta los efectos de la no linealidad del material para la obtención de los valores de diagramas tensión-CMOD que posteriormente será validado con el modelo numérico.

El capítulo está dividido en dos partes la primera muestra los ensayos de caracterización en vigas y una segunda parte donde se muestran los resultados experimentales en paneles.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS VIGAS

La prueba de flexión de tres puntos de una viga con entalla se utiliza para la determinación de los parámetros del material SFRC, el comportamiento a la tracción se describe en términos de Resistencia a la tracción a la flexión residual determinada a partir de la curva de desplazamiento de apertura de la boca frente a la curva de deflexión proporcionada por la prueba de flexión. (FIGURA 3-1). La viga tiene una longitud de 500 mm, con una extensión de 25 mm en ambos lados de los soportes, con una longitud total de 550 mm. La viga tiene una sección transversal de 150 mm x 150 mm. Se produce una entalla en el área central inferior de la muestra para una profundidad de 5 mm.

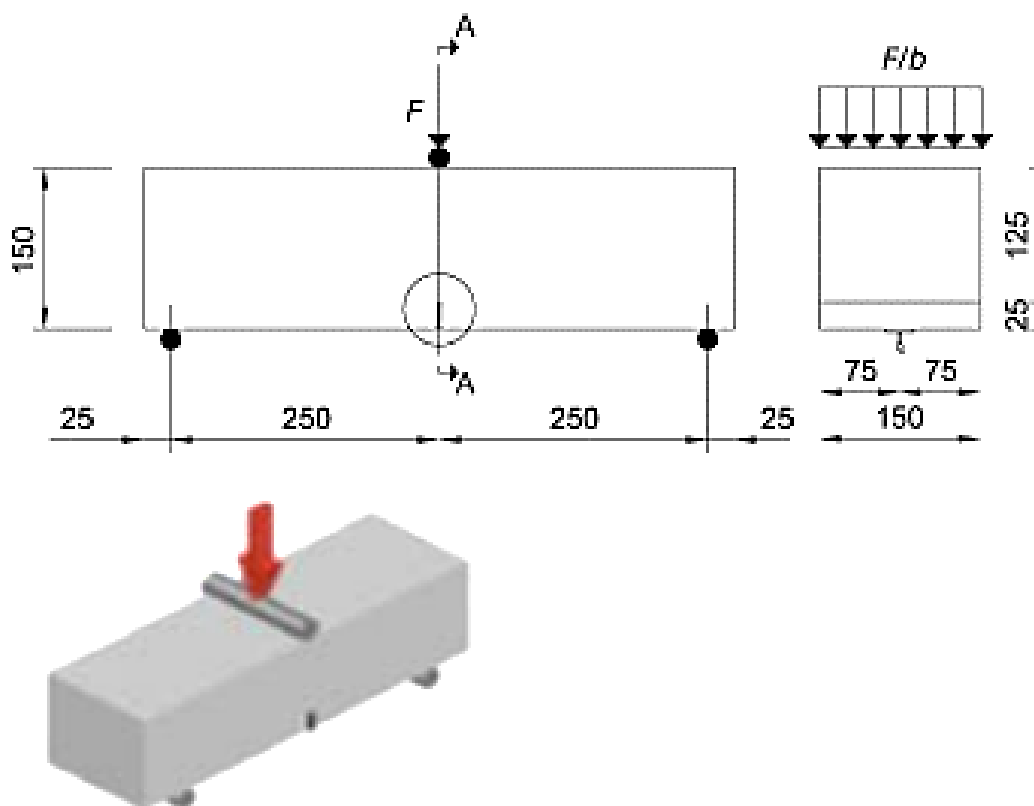


FIGURA 3-1 Detalle del ensayo "Three point bending test"

3.2.1 Propiedades de los materiales

En el presente capítulo se podrá conocer y estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibra Barchip54, ante un incremento de carga y los resultados de la tenacidad que este libera.

Para lograr el objetivo propuesto se elaboraron mezclas de hormigón diseñadas para shotcrete, reforzadas con 4,8,12 kilogramos de fibra por metro cúbico de hormigón. Con los resultados de los ensayos se determinó la energía disipada y la capacidad de absorción de energía de las probetas. De esta forma, se encontraron las curvas en función de la carga-CMOD. En total se estudiaron 40 paneles de fibra Barchip 54. Para el estudio se usaron las dosificaciones presentes en la Tabla 3-1 a continuación:

Tabla 3-1

Dosificación del hormigón.

Material Kg/m³	Dosificación
Cemento	420
Arena Semi Industrial	1340
Arena correctora	331
Plastocrete MX-1390	2.10
Viscocrete 5100	2.10
SiliceColoidal	2.94
Agua total	215
Relación a/c	0.511

Fuente: Ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Marina, Valparaíso-Chile

Así mismo se presenta las propiedades mecánicas de las fibras Barchip 54 en la Tabla 3-2 a continuación:

Tabla 3-2

Características de la fibra Barchip 54

Características	Barchip 54
Largos	54 (mm)
Resistencia a tracción	640 Mpa.
Cantidad de Fibra	37.000 Fibras/Kg
Densidad Relativa	0.90-0.92
Módulo de Elasticidad	10Gpa
Punto de fusión	159 C- 179C

Fuente: Ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Maria, Valparaíso-Chile

3.2.2 Resultados de caracterización en ensayo de viga: Carga-CMOD

Se realizó un análisis de probetas ensayadas en laboratorio, las cuales cuentan con una dosificación de 4 [kg] de fibra, 8 [kg] de fibra y 12 [kg] de fibra por metro cúbico de hormigón, de dichos resultados podemos determinar el comportamiento tensional a través de la curva carga-CMOD. Se ensayaron un total 40 probetas con diferente cuantía de fibra como se muestra en la Tabla 3-3 a continuación:

Tabla 3-3

Distribución de probetas panel EFNARC-Barchip 54

Cantidad de fibras (kg/m³)	Cantidad de Probetas
4	13
8	14
12	13

Fuente: Ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Marina, Valparaíso-Chile

Para el análisis general se estudió el promedio de las cargas soportadas por un cierto número de muestras y la tenacidad de estas, las cuales se muestra, dando los siguientes resultados. En la FIGURA 3-2 se puede ver el comportamiento en función de carga-CMOD que tiene un hormigón dosificado con una cuantía de 4kg/m³ de fibra de acero.

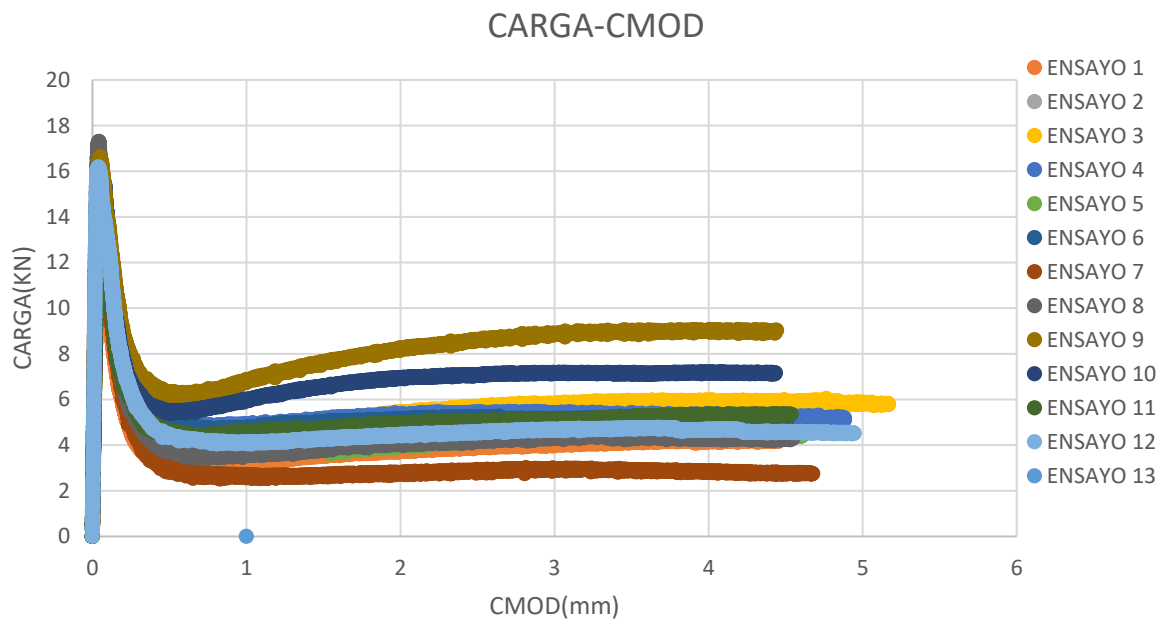


FIGURA 3-2 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m³] de Fibra Barchip54. Fuente: Elaboración propia

Para trabajar con un valor representativo del comportamiento tensional, se determina el valor promedio de carga que soporta el panel con la mínima cuantía en función de la apertura, como se puede observar en la FIGURA 3-3.

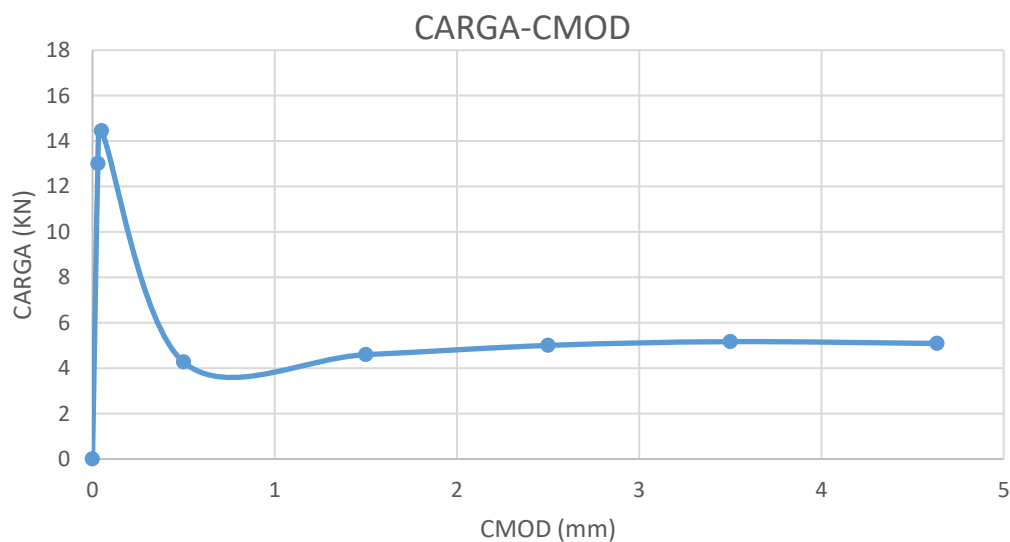


FIGURA 3-3 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia

Como mencionamos en el marco teórico es necesario determinar los parámetros, fR_j , en función de la ecuación 2.3 que representan la tensión de flexión residual, a partir de la relación F-CMOD, para obtener para diferentes aberturas de fisura y sus flechas asociadas en la sección central, en base a estas cargas se determinó las resistencias residuales a flexión y el diagrama carga aplicada-CMOD que se obtiene para un hormigón de cuantía 4kg/mm^3 tiene la forma que muestra en la FIGURA 3-4 a continuación:

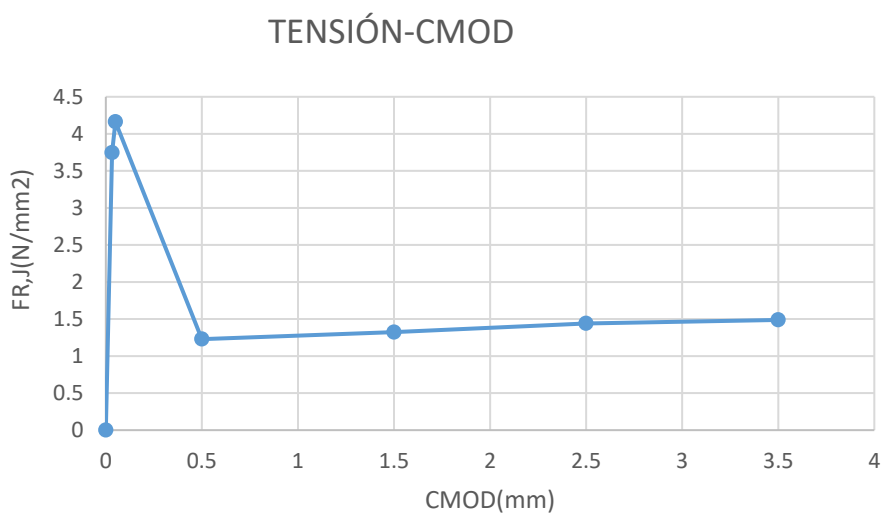


FIGURA 3-4 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 4 [Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4

Valores de tensión residual, cuantía 4kg/m³

CMOD	CARGA	TENSION RESIDUAL FR,j
mm	KN	N/mm2
0	0.00	0
0.03	13.01	3.75
0.05	14.45	4.16
0.5	4.27	1.23
1.5	4.59	1.32
2.5	5.00	1.44
3.5	5.17	1.49

Fuente: Elaboración propia

En la FIGURA 3-5 y FIGURA 3-6 siguiendo el procedimiento antes mencionado se puede observar el comportamiento en función de Carga-CMOD que posee un hormigón dosificado con una cuantía de 8Kg/m³ de fibra.

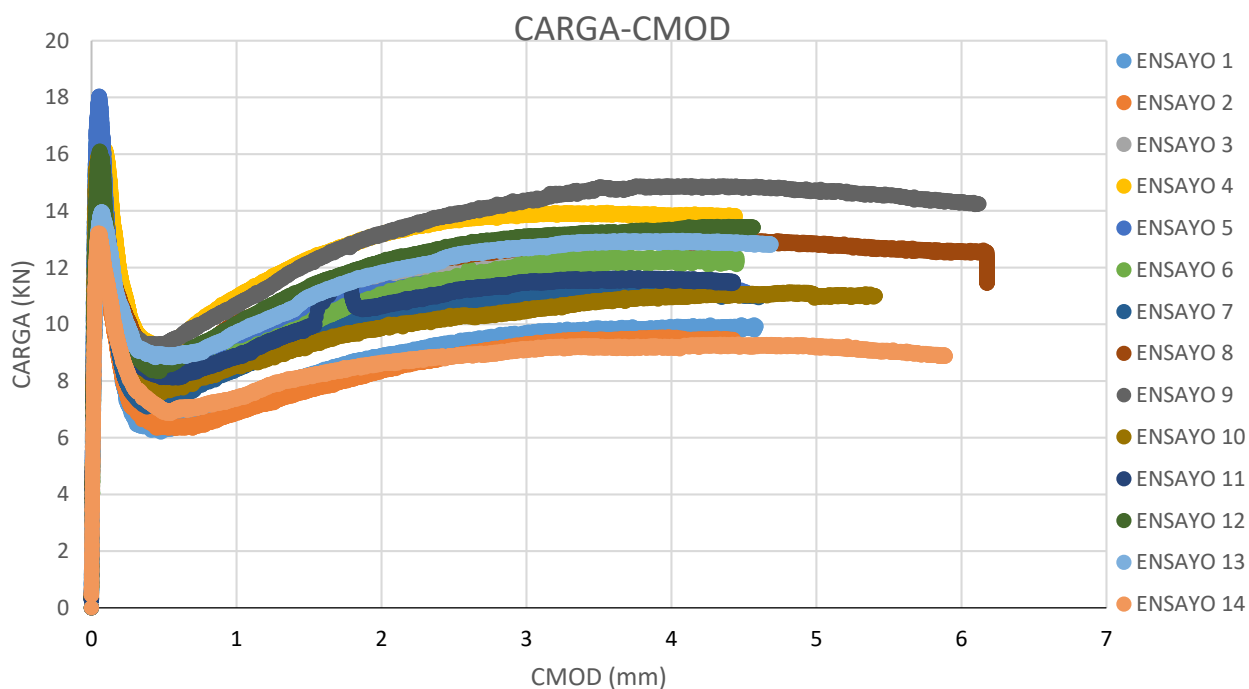


FIGURA 3-5 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m³] de Fibra Barchip54. Fuente: Elaboración propia.

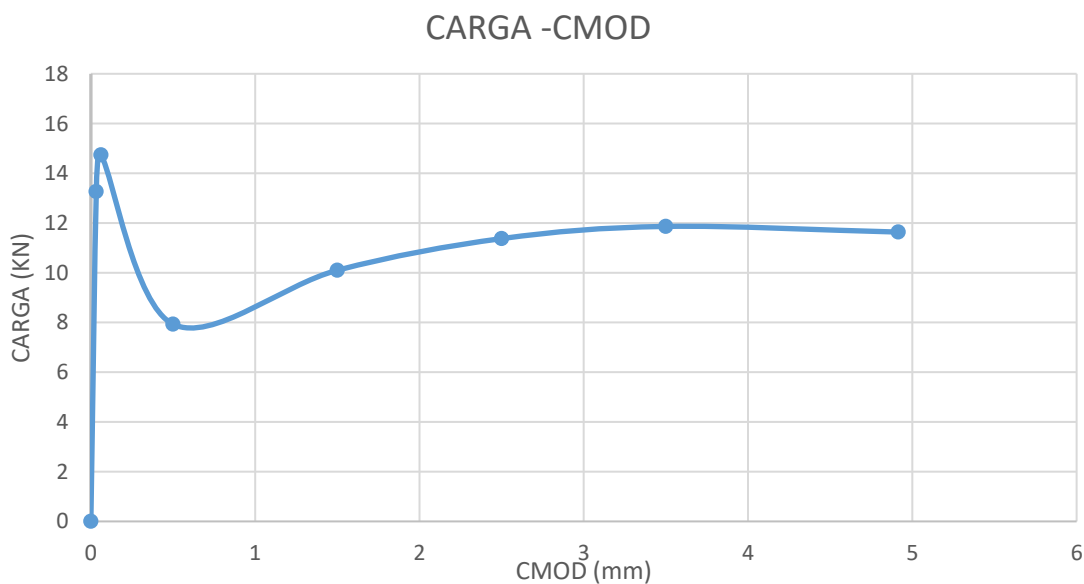


FIGURA 3-6 Carga [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio. Fuente: Elaboración propia.

Se determina la tensión residual para una dosificación de 8kg/mm³ como se muestra en la FIGURA 3-7 y sus valores en la Tabla 3-5

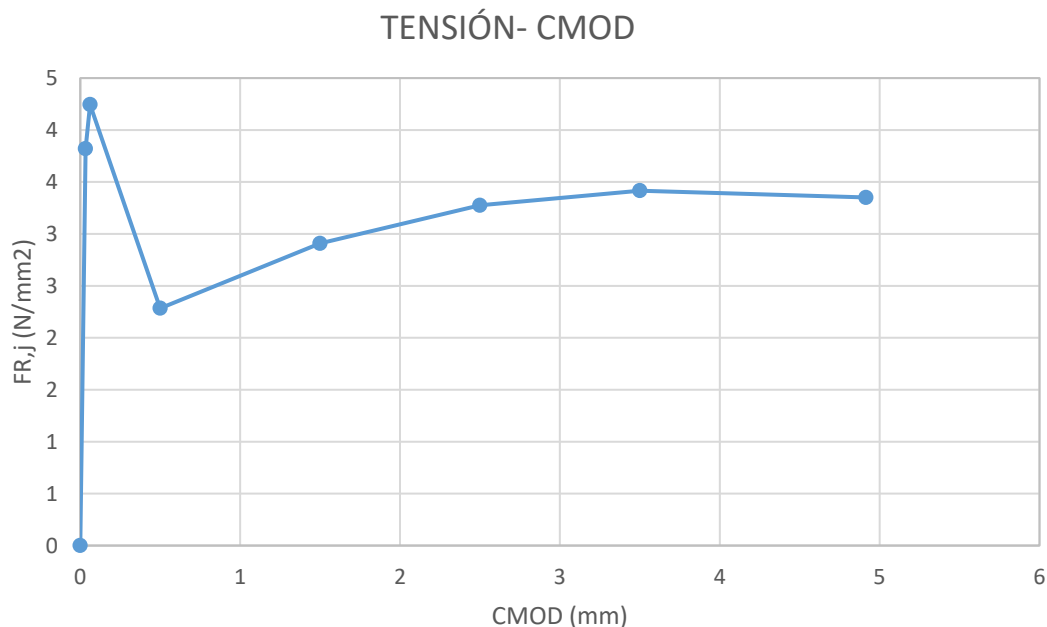


FIGURA 3-7 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 8 [Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5

Valores de tensión residual, cuantía 8kg/m³

CMOD	CARGA	TENSION RESIDUAL FR,j
mm	KN	N/mm ²
0	0.00	0.00
0.03	13.27	3.82
0.06	14.74	4.24
0.5	7.93	2.28
1.5	10.10	2.91
2.5	11.37	3.28
3.5	11.86	3.42
4.91	11.64	3.35

Fuente: Elaboración propia

En la FIGURA 3-8se puede ver el comportamiento en función de carga-CMOD que tiene un hormigón dosificado con una cuantía de 12kg/m³ de fibra de acero.

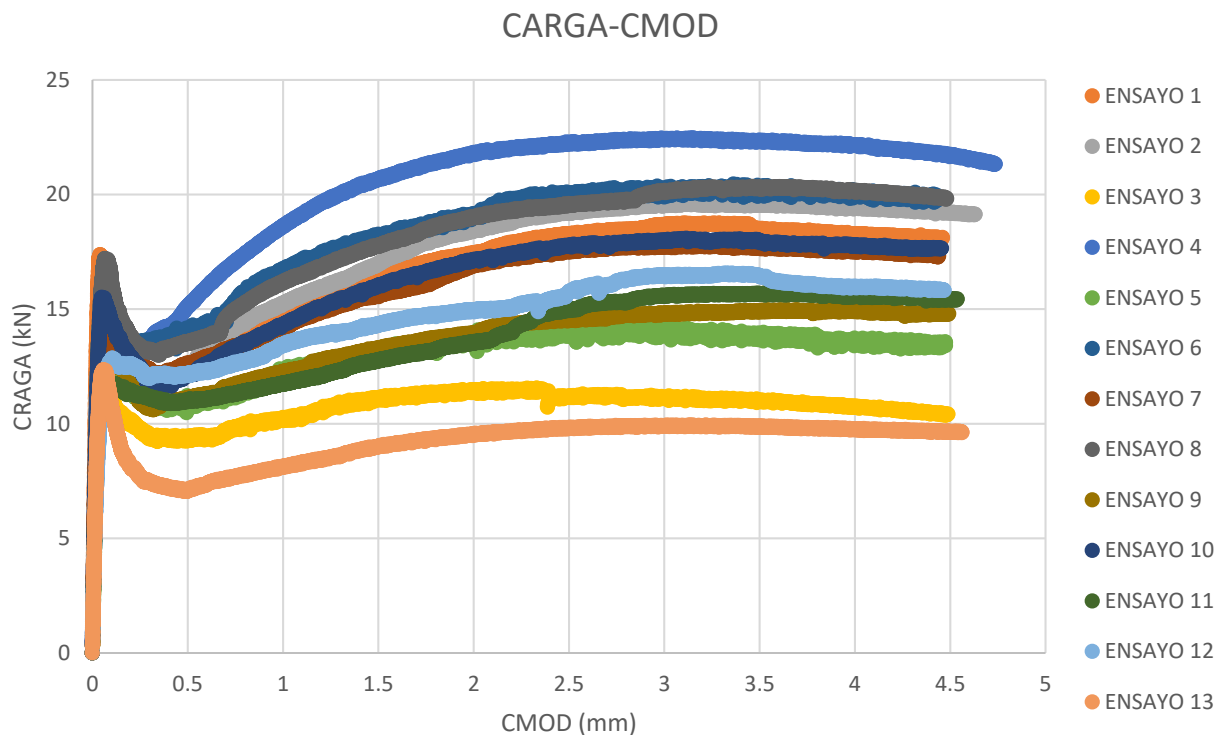


FIGURA 3-8 Digrama carga -CMOD de vigas con 12 [Kg/m³] de Fibra Barchip54. Fuente: Elaboración propia.

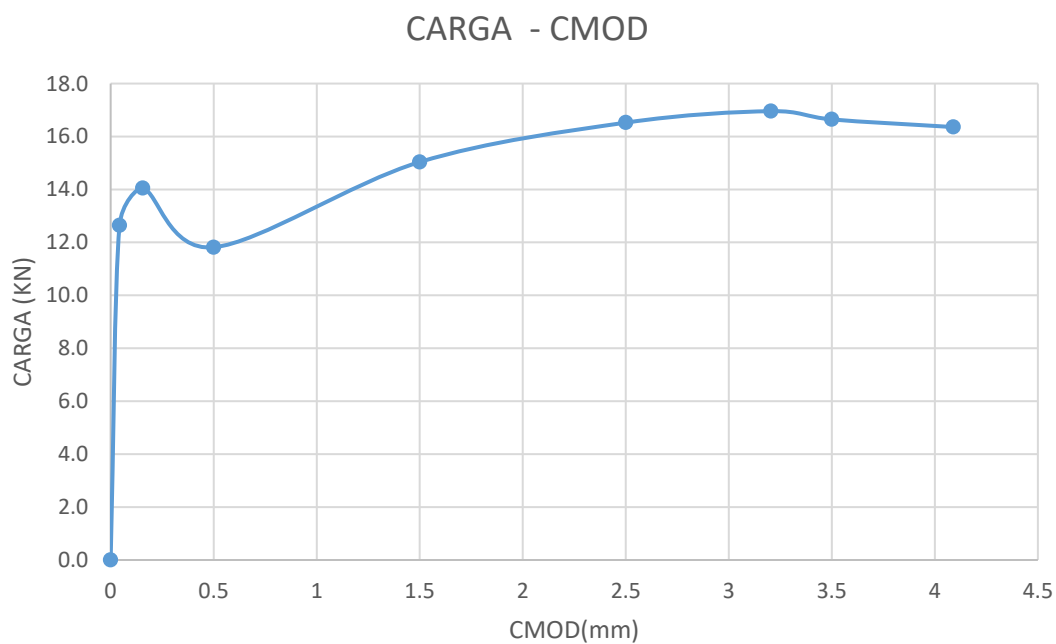


FIGURA 3-9 Diagrama carga CMOD de vigas con 12 [Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio. Fuente: Elaboración propia.

Se determina la tensión residual para una dosificación de 8kg/mm³ como se muestra en la FIGURA 3-10y sus valores en la Tabla 3-6

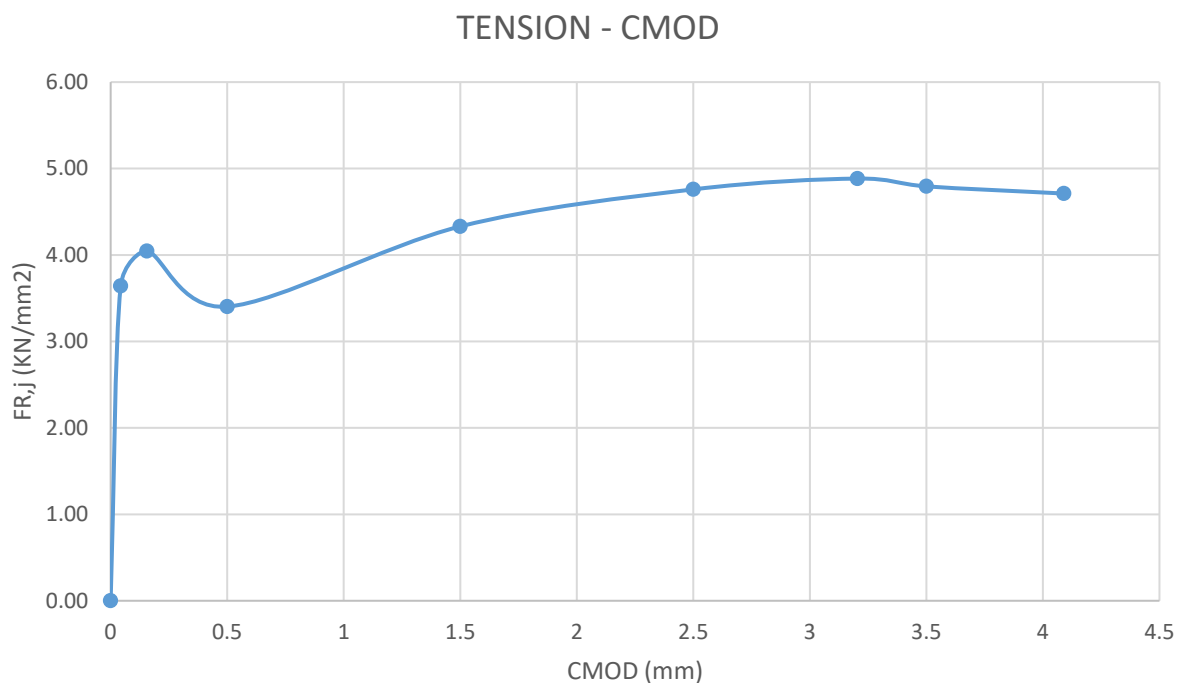


FIGURA 3-10 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 12[Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-6

Valores de tensión residual, cuantía 12kg/m³

CMOD	CARGA	TENSIÓN RESIDUAL FR,j
mm	KN	N/mm ²
0	0.0	0.00
0.04	12.6	3.64
0.16	14.0	4.05
0.5	11.8	3.40
1.5	15.0	4.33
2.5	16.5	4.76
3.2	17.0	4.88
3.5	16.6	4.79
4.09	16.4	4.71

Fuente: Elaboración propia.

Para finalizar con la caracterización del material es necesario determinar la Tensión residual de diseño, cuyos valores serán introducidos en la simulación numérica, para esto es necesario el uso de los modelos constitutivos (Tabla 2-4) propuestos en este caso por el fib Model Code, en la Tabla 3-7 se resumen las tensiones residuales de diseño para las cunatías propuestas y en la FIGURA 3-11 se puede observar su comportamiento.

Tabla 3-7

Valores de tensión residual de diseño, cuantías, 4- 8-12kg/m³

Tensión Residual de Diseño					
CMOD	4Kg/m ³	CMOD	8Kg/m ³	CMOD	12Kg/m ³
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.030	1.748	0.033	1.783	0.043	1.699
0.050	1.942	0.062	1.981	0.156	1.888
0.500	0.553	0.500	1.028	0.500	1.531
2.500	0.474	2.500	1.251	2.500	2.020

Fuente: Elaboración propia

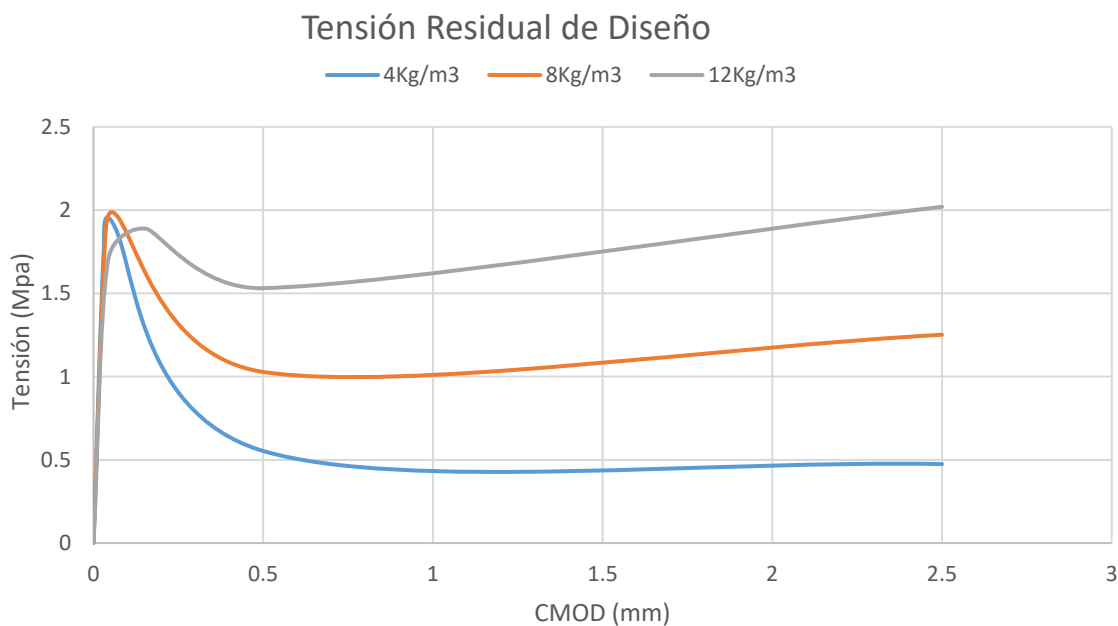


FIGURA 3-11 Carga (Resistencia residual a flexión) [KN] por probeta vs CMOD para 12[Kg/m³] de Fibra Barchip54, representación promedio, baja cuantía. Fuente: Elaboración propia

3.3 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL PANEL

El análisis se centrará en el panel de hormigón EFNARC reforzado con fibras, cuyas medidas están estandarizadas y normado según EN 14487. Las dimensiones de los paneles de shotcrete reforzado con fibras son: 600 mm x 600 mm x 100 mm, y la superficie de contacto de 100x100mm según EN 14488-5. La geometría de muestra en la FIGURA 3-12

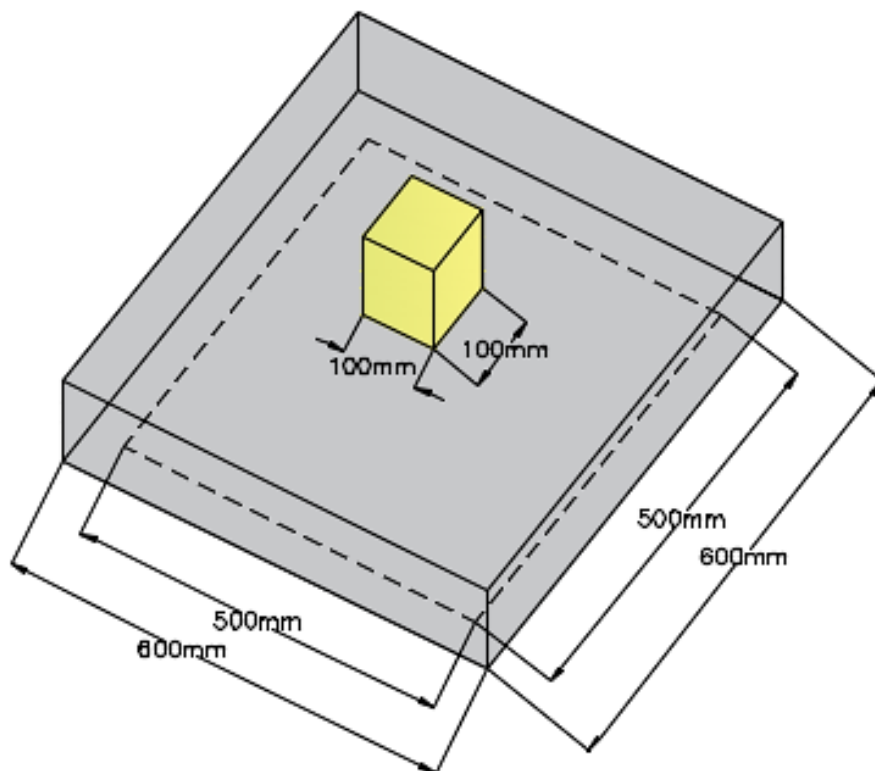


FIGURA 3-12 Detalle de la geometría de panel EFNARC. Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Resultados experimentales

Como se explicó en el capítulo anterior, las pruebas en laboratorio se realizan bajo control de desplazamiento del actuador, el ensayo consiste en aplicar una carga puntual en el centro del panel cuadrado apoyado por los cuatro lados a una velocidad de deflexión 1,5 mm/min sobre una superficie de 100x100mm hasta alcanzar una deflexión de 25mm. En base a esta metodología se han obtenido los resultados del comportamiento del panel EFNARC.

3.3.2 Tipo de rotura

Experimentalmente se ha observado que, para bajas cuantías de fibras, la falla se produce por flexión, con la formación de dos grietas diagonales. Para cuantías medias y altas, inicialmente se produce la fisuración por flexión, la que provoca los primeros picos que se pueden observar en las curvas $P - \delta$. Sin embargo, debido a la presencia de la fibras, para mantener la velocidad de deformación establecida, el sistema de ensayos debe incrementar la carga, lo que sumado a la fuerza de roce que se desarrolla en la zona apoyada del panel, da origen a una falla por punzonamiento, provocando la formación de grietas en torno a la zona cargada, limitando el trabajo de las fibras en tracción, distorsionando la medición de la deflexión realizada sobre la cara superior del panel y permitiendo concluir que el panel no falla sólo por flexión. [26]

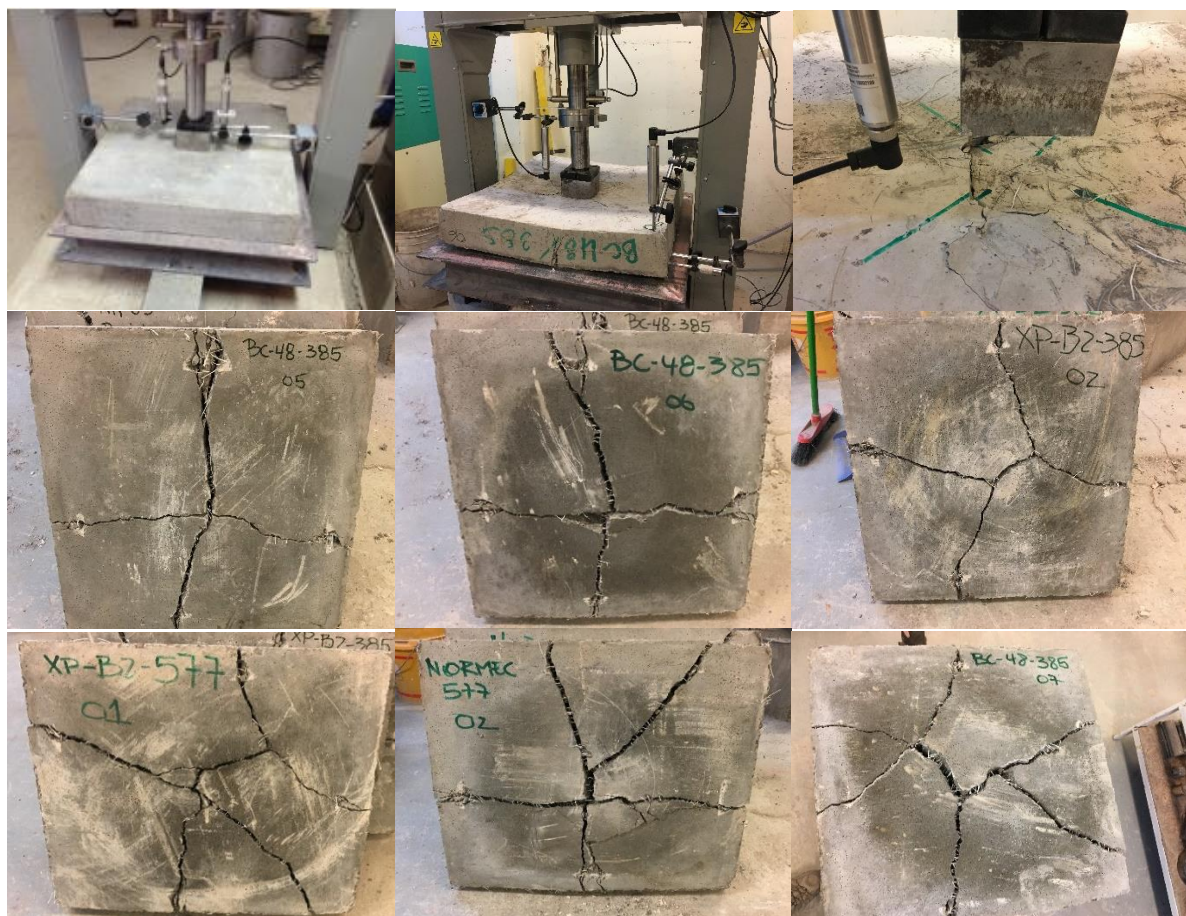


FIGURA 3-13 Detalle de la formación de grietas radiales panel de EFNARC con diferentes cuantías de fibra.
Fuente: Ensayos realizados en la Universidad Técnica Federico Santa Marina, Valparaíso-Chile

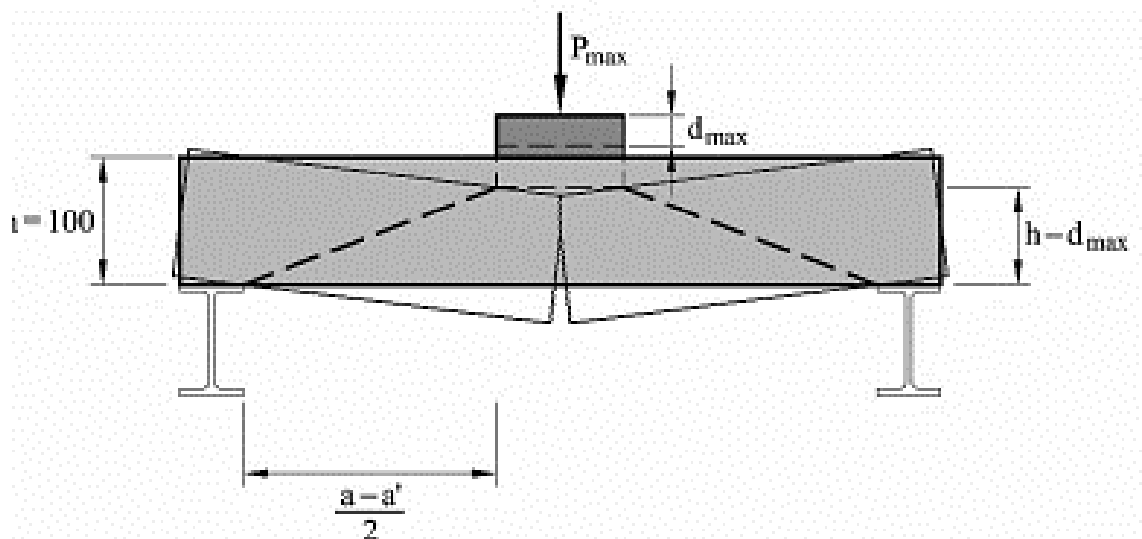


FIGURA 3-14 Geometría para el cálculo del efecto de arco en el panel agrietado. Fuente: Use of Barcelona test for controlling energy absorption.

3.3.3 Ensayo panel EFNARC

Se cuenta con ensayos de 27 paneles dosificados con diferente cuantía de fibra como se muestra en la Tabla 3-8 a continuación.

Tabla 3-8

Distribución paneles EFNARC BARCHIP 54

Cantidad de fibras [Kg/m³] por Probeta	Cantidad
4	10
8	10
12	7

Fuente: Universidad técnica Santa María-Valparaíso Chile

Los ensayos dan como resultado la carga máxima que resisten las probetas, para obtener los datos se contó con un sistema de control hidráulico de 100KN de capacidad, con un rango de deformación de 50mm, posicionada en la cara inferior del panel. Los datos presentados establecieron 3 datos por segundo como se resume en la Tabla 3-9. En dicha tabla se presentan los valores promedios de los ensayos para cada cuantía de fibra.

Tabla 3-9

Carga Máxima de acuerdo EfNARC BARCHIP 54

DEFORMACIÓN [MM]	Carga Máxima [KN] por Cantidad de Fibra [kg]		
	4KG FIBRA	8 KG FIBRA	12 KG FIBRA
0	0	0	0
1	18,403	26,840	16,204
2	30,661	36,800	34,474
3	35,555	48,097	50,726
4	38,795	52,826	58,088
5	39,928	55,142	64,087
6	38,998	54,210	69,222
7	39,561	55,417	70,645
8	39,706	55,471	69,896
9	39,175	53,869	66,389
10	38,191	52,410	64,465
11	36,996	50,744	62,253
12	36,265	48,707	58,560
13	35,304	46,906	55,760
14	34,415	44,474	53,889
15	33,325	42,493	51,087
16	32,441	40,895	49,076
17	31,319	39,604	47,644
18	30,214	38,205	45,896
19	29,462	37,034	44,275
20	28,490	35,766	43,193
21	27,375	34,550	42,203
22	26,473	33,568	40,504
23	25,677	32,208	39,098
24	24,612	31,106	37,347
25	23,461	30,021	36,319

Fuente: Universidad técnica Santa Maria-Valparaiso Chile

En los ensayos en Panel EFMARC mostrados en la tabla anterior, el comportamiento de la carga aplicada muestra la resistencia máxima del panel, es decir, cuando la fractura inicia entre los 5 y 10mm de deflexión, posteriormente decrece de manera gradual hasta los 25mm donde la fibra se somete a su esfuerzo máximo, como se muestra en las siguientes figuras.

Resultados promedio del comportamiento Carga-Deformación para una cuantía de 4Kg/m³

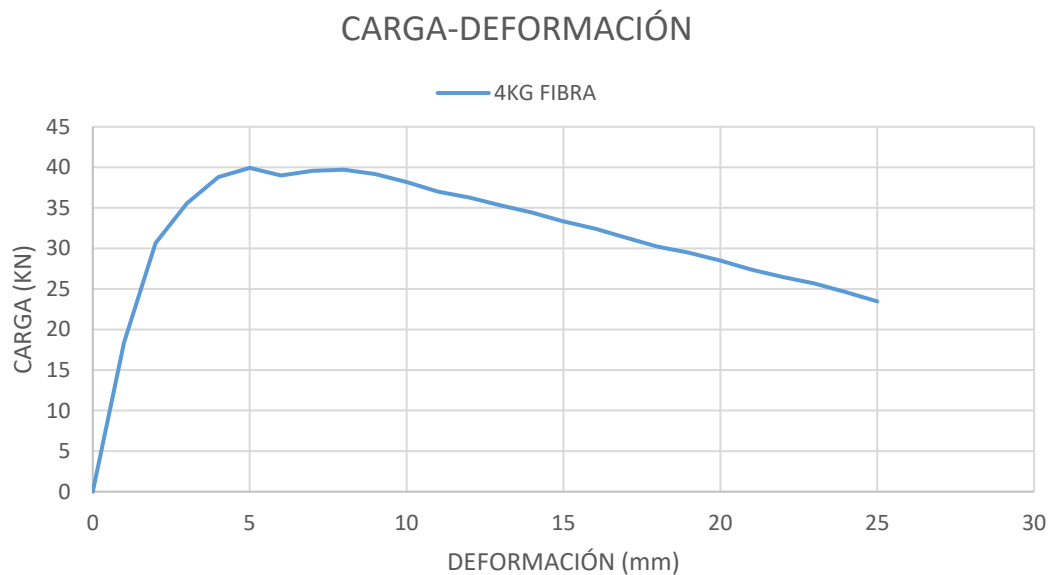


FIGURA 3-15 Carga vs Deformación ensayos experimentales-4kg/m³. Fuente: Elaboración propia

Resultados promedio del comportamiento Carga-Deformación para una cuantía de 8Kg/m³

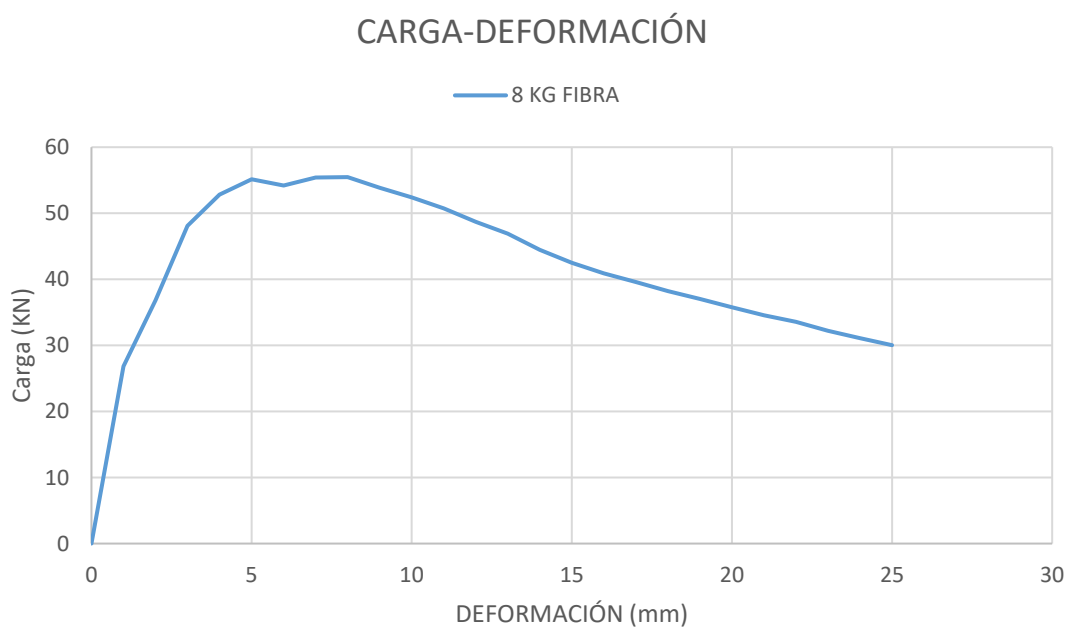


FIGURA 3-16 Carga vs Deformación ensayos experimentales-8kg/m³. Fuente: Elaboración propia

Resultados promedio del comportamiento Carga-Deformación para una cunfia de 12Kg/m³

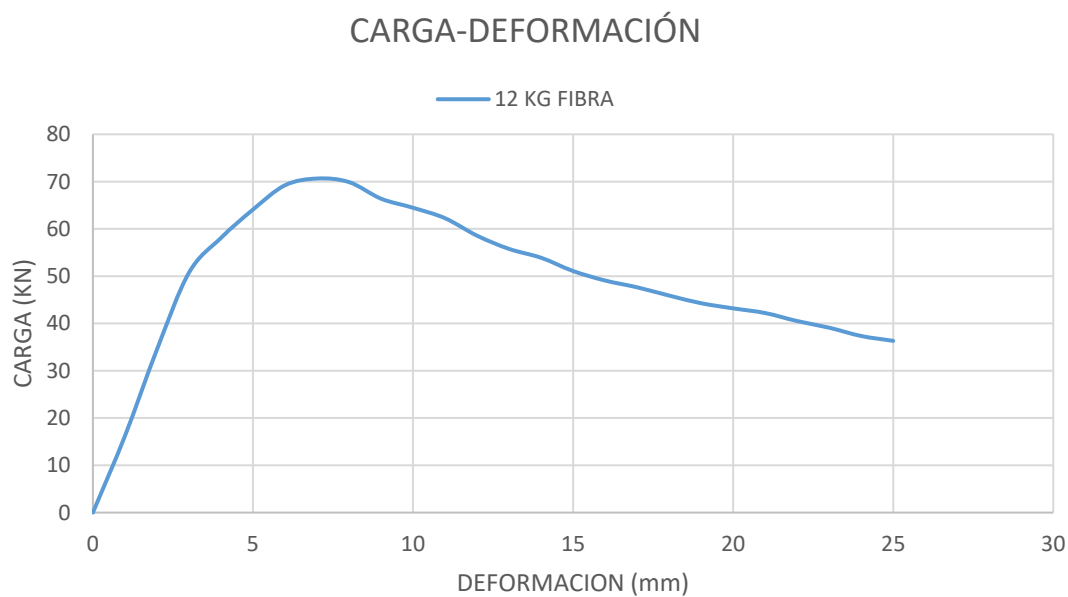


FIGURA 3-17 Carga vs Deformación ensayos experimentales-12kg/m³. Fuente: Elaboración propia

Resultados promedio del comportamiento Carga-Deformación para las diferentes cuantías.

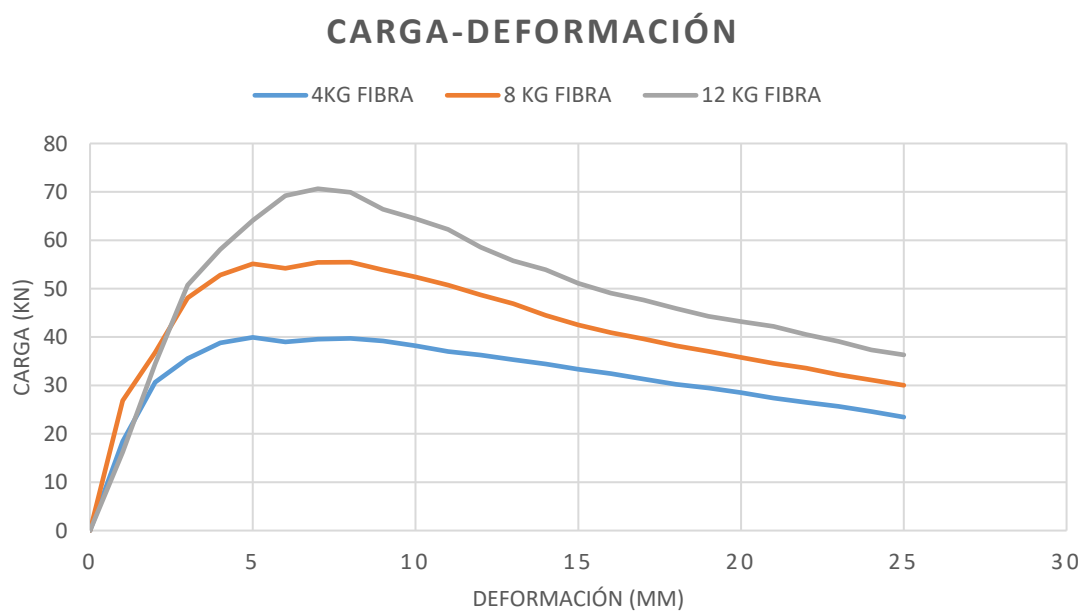


FIGURA 3-18 Carga vs Deformación extensómetro. Fuente: Elaboración propia

Partir de los datos de carga-deformación mediante el uso de la Ecuación (2-1), se da a conocer la energía absorbida por los paneles, los datos se muestran en la

Tabla 3-10. Se observa que el contenido de fibra influye directamente en el comportamiento de los paneles, queda claro que a mayor cantidad de fibra mayor es la energía absorbida.

Tabla 3-10

Energía Absorbida (J)- EfNARC BARCHIP 54

Deformación	Energía [J] por cantidad de Fibra[Kg]		
	4[Kg]	8[Kg]	12[Kg]
0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	8.45	12.20	6.60
2.00	32.78	45.55	32.97
3.00	66.95	88.73	74.39
4.00	104.35	140.08	128.05
5.00	143.84	193.86	189.59
6.00	183.25	248.67	256.43
7.00	222.54	303.61	326.59
8.00	262.42	359.33	396.97
9.00	301.81	414.19	464.96
10.00	340.56	466.53	530.36
11.00	378.18	517.85	593.73
12.00	414.68	567.58	654.16
13.00	450.41	616.49	711.41
14.00	485.23	662.38	766.10
15.00	519.15	705.82	818.58
16.00	552.12	747.50	868.53
17.00	583.85	787.66	916.78
18.00	614.72	826.60	963.98
19.00	644.50	864.17	1009.29
20.00	673.42	900.56	1053.19
21.00	701.28	935.70	1095.61
22.00	728.34	969.75	1137.01
23.00	754.42	1002.66	1177.36
24.00	779.49	1034.27	1215.58
25.00	803.57	1064.94	1252.41

Fuente: Universidad técnica Santa Maria-Valparaiso Chile

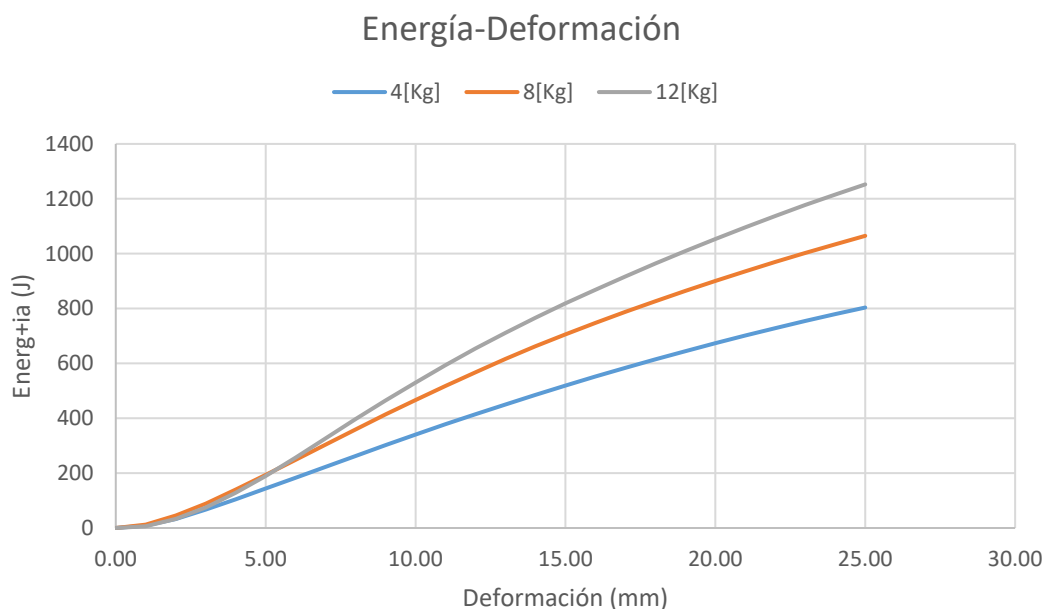


FIGURA 3-19 Energía Absorbida en J hasta los 25mm de deflexión. Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Parámetros mecánicos del material según fib Model Code 2010

El presente trabajo toma como base las propiedades del material según lo especificado en fib Model Code for Concrete Structures 2010. Para determinar los parámetros tensionales del hormigón se parte de la resistencia característica a compresión; mediante las siguientes formulas se puede determinar el comportamiento a compresión y el comportamiento a tensión, así mismo se determina parámetros importantes dentro de los hormigones con fibras como la energía de fractura a compresión y a tracción; estos parámetros posteriormente se introducen en el modelo numérico con el objetivo de que represente el estado tensional del hormigón.

- ✓ La resistencia media a compresión se define mediante la siguiente ecuación:

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (3-1)$$

Donde: $\Delta f = 8 \text{ Mpa}$.

Resistencia a compresión característica f_{ck} en Mpa

- ✓ Resistencia de diseño a compresión

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3-2)$$

Dónde: Coeficiente de efecto a largo plazo $0.8 < \alpha_{cc} < 1$

Coeficiente de seguridad del concreto $\gamma_c = 0.15$

- ✓ Resistencia característica a tracción

$$f_{ctm} = 0.3f_{ck}^{2/3} \leq 50 \quad (3-3)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln(1 + 0.1f_{cm}) > 50$$

- ✓ Resistencia característica a tracción mínima.

$$f_{ck, \min} = 0.7f_{ctm} \quad (3-4)$$

- ✓ Resistencia característica a tracción máxima.

$$f_{ck, \min} = 1.3f_{ctm} \quad (3-5)$$

- ✓ Resistencia de diseño a compresión.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ck, \min}}{\gamma_c} \quad (3-6)$$

Siguiendo con los parámetros de compresión y tracción definimos:

- ✓ Energía de fractura

$$G_F = 73 * f_{cm}^{0.18} \quad (3-7)$$

- ✓ Energía de fractura a compresión

$$G_c = 250 * G_F \quad (3-8)$$

- ✓ Módulo de deformación después de 28 días.

$$E_{ci} = E_{co} * \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (3-9)$$

También es importante dejar definido las propiedades lineales del material concreto.

Donde

- ✓ Módulo de elasticidad inicial $E_{co}=21500\text{Mpa}$.

- ✓ Coeficiente de Poisson inicial $\nu=0.15$
- ✓ Densidad del hormigón $\rho=2400\text{kg/m}^3$ - $\rho=2500\text{kg/m}^3$

Como se muestra en la Tabla 3-1, donde se establece la dosificación del hormigón ensayado, se determina de manera numérica los parámetros material en función de la resistencia característica a compresión siguiendo los lineamientos del fib Model Code como se muestra en la Tabla 3-11 a continuación:

Tabla 3-11

Parámetros según fib Mode Code 2010- $f_{ck}=42\text{Mpa}$

Parámetros según código modelo 2010			
Resistencia característica compresión	f_{ck}	42.0	Mpa
Resistencia a la compresión	f_{cm}	50.0	Mpa
Resistencia de cálculo a compresión	f_{cd}	28.0	Mpa
Resistencia media a tracción	f_{ctm}	3.6	Mpa
Resistencia característica a tracción	$f_{ctk,mín}$	2.5	Mpa
Resistencia característica a tracción	$f_{ctk,máx}$	4.7	Mpa
Módulo de deformación instantáneo	E_c	36764.5	Mpa
Módulo de deformación	E_{cm}	33589.4	Mpa
Energía de fractura en tensión	G_F	147.6	N/m
Energía de fractura en compresión	G_C	36.9	N/mm
Resistencia de diseño a tracción	$f_{ct,d}$	1.7	Mpa
Coef. variación	Δf	8.0	Mpa
Módulo de elasticidad inicial	E_{co}	21500.0	Mpa
Densidad hormigón	ρ	0.0	T/mm ³
Poisson ratio	ν	0.2	

Fuente: Elaboración propia.

En conclusión, en el presente capítulo queda definido el comportamiento de un hormigón con diferentes contenidos de fibra (4,8,12kg/m³) a base de los ensayos de caracterización del material; se define dimensiones, dosificación de hormigón y de fibra, comportamiento tensional, así como datos relevantes de carga y energía. Con toda la información se procede a introducir a Diana-FEA para empezar el proceso de calibración y obtención de resultados que posteriormente serán la base de comparación entre los datos experimentales y el modelo numérico.

CAPITULO 4.

SIMULACIÓN NUMÉRICA (DIANA-FEA)

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan detalles para desarrollar un modelo numérico en base a la campaña experimental, en primer lugar se simula las vigas para la carterización del material y posteriormente el ensayo EFNARC suponiendo conocido de manera experimental el mecanismo de fallo y el comportamiento del material.

Con el objetivo de conocer el compotamiento del material reforzado con fibras , se ha realizado una comprobación , la cual consiste en el modelado de una serie de vigas correspondientes a la campaña experimental resumidas en el capitulo 3 de este proyecto, simulando las vigas en elementos bidimensionales y tridimensionales de caracterización del material obteniendo los resultados de carga, deformación, ancho de fisura y tensiones para un hormigón dosificado con 4Kg/m^3 , 8Kg/m^3 y 12Kg/m^3 y un hormigón SFRC 3c, con una clase de referencia específica C30 para hormigón plano descrito el procedimiento en el Anejo 1. Dichos modelos se calibraran con múltiples ensayos de los que se disponen resultados experimentales tanto para vigas como para el ensayo de panel EFNARC, que se aplicará para estudiar la sensibilidad del ensayo.

En los modelos se analizan diferentes aspectos de la modelización no lineal como son las leyes constitutivas del hormigón, tratamiento de la fisuración, así como métodos de soluciones del

problema no lineal de tal forma que se pueda captar correctamente la fisuración y el comportamiento a tensión del panel EFNARC para obtener curvas tensión-deformación.

Una vez validado y calibrado el modelo de análisis no lineal con los resultados experimentales, el mismo ha servido para realizar un estudio paramétrico para estudiar la influencia de ciertos parámetros de la modelización en la respuesta de la estructural. El objetivo, por tanto, es analizar las diversas capacidades del programa DIANA FEA y estudiar la influencia de ciertos parámetros numéricos en la respuesta tensional del panel EFNARC.

4.2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DIANA-FEA

DIANA (DI splacement **ANA** lyzer) es un extenso paquete de software de análisis de elementos finitos (FEA) multipropósito dedicado, pero no exclusivo, a una amplia gama de problemas que surgen en la ingeniería civil, incluidas las disciplinas estructurales, geotécnicas, de túneles, terremotos e ingeniería de petróleo y gas.

DIANA está equipada con solucionadores muy potentes que permiten el análisis de una amplia gama de estructuras, grandes y pequeñas, con análisis básicos o avanzados. La robusta funcionalidad del programa incluye modelos de materiales extensos, bibliotecas de elementos y procedimientos de análisis, que se basan en las técnicas de análisis de elementos finitos más recientes y más avanzadas, lo que le da a DIANA un alto grado de flexibilidad.

DIANA ha sido equipada con potentes solucionadores para optimizar los procedimientos de solución para todo tipo de modelos complejos lineales y no lineales con resultados precisos y cálculos rápidos. Sus capacidades de análisis únicas están potenciadas por capacidades de modelado completo en entornos 2D y 3D y herramientas para la interoperabilidad CAD.

Los principales campos de uso de DIANA incluyen diseño y análisis de presas y diques; túneles y estructuras subterráneas; petróleo y gas, construcciones históricas y grandes estructuras de

hormigón armado. Algunos de los análisis especializados disponibles en DIANA-FEA para estos campos de uso incluyen el análisis sísmico; análisis de fuego y hormigón joven endurecido.



FIGURA 4-1 Programa comercial DIANA FEA .Fuente: DIANA-FEA

4.3 DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Los modelos numéricos que describen el comportamiento a rotura o fisura de los materiales cuasi-frágiles y el comportamiento post-fisuración en base a dos metodologías distintas de modelización, la fisura discreta ya la fisura distribuida.

- ✓ Los modelos que describen la fractura a través de la fisura discreta son modelos de elementos finitos en los cuales se incluyen elementos de tipo junta para representar el comportamiento de las fisuras en el HRF. Estos modelos van desde la mecánica de la fractura elástica lineal en el nivel más simple, a los modelos de fisura cohesiva.[19]

El principal inconveniente de los modelos de fisuración discreta reside en la necesidad de conocer a priori el punto donde aparecerá la fisura para poder ubicar correctamente los elementos de junta. En consecuencia, este tipo de modelización no es válida para elementos estructurales en las cuales no se conoce donde tienen que aparecer las fisuras.[2]

- ✓ Los modelos basados en las formulaciones del continuo (es decir, formulada en términos de los tensores de tensión y deformación), dentro de este grupo se encuentran los modelos de gradientes, no locales, los modelos de banda o también denominados de fisura cohesiva difusa o fisura distribuida y modelos de singularidad fuerte.[19]

Los modelos de fisuración permiten simular donde se producen las fisuras y su evolución en función de sus propiedades mecánicas, en estos modelos no es necesario conocer previamente la posición y dirección en que se va a producir la fisura, sino que el propio modelo lo determina automáticamente para los puntos en que la tensión de tracción del hormigón se ve superada. Este tipo de modelos, permite evaluar el comportamiento de elementos estructurales complejos en los cuales no se conoce a priori donde va a aparecer la primera fisura, como se van a redistribuir los esfuerzos y los nuevos procesos de fisuración.[2]

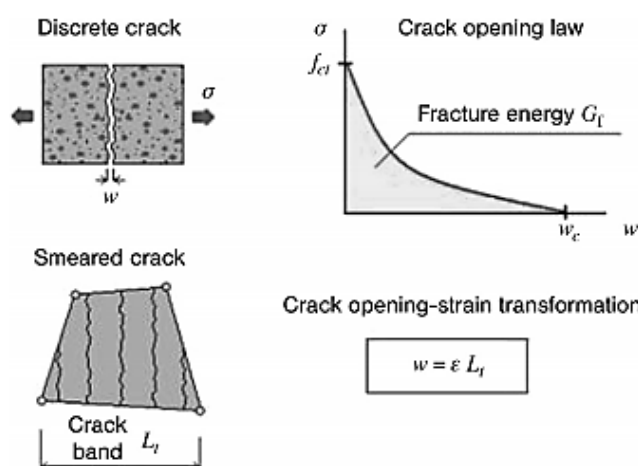


FIGURA 4-2 Modelos de fisuración. Fuente: fib Model Code

4.3.1 Tipo de elemento, Vigas.

Se han simulado mediante un modelo no lineal de elementos en dos y tres dimensiones en DIANA-FEA los ensayos experimentales en vigas para la caracterización del material. En la FIGURA 4-3 se muestra un modelo 3D considerando las dimensiones establecidas en la EN 16551, de longitud de 500 mm, con una extensión de 25 mm en ambos lados de los soportes, con una longitud total de 550 mm. ella viga tiene una sección transversal de 150 mm x 150 mm y la entalla en el área inferior con una profundidad de 5 mm. En el Anejo 1 del la presente tesina queda

descrito de manera detallada el tipo de elemento utilizado, el tamaño máximo del elemento, las condiciones de contorno, la carga y el criterio de convergencia utilizado para el análisis en vigas.

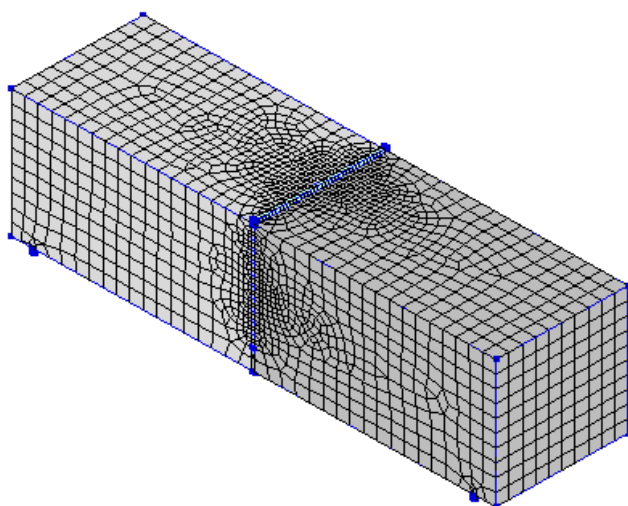


FIGURA 4-3 Modelo numérico de panel EFNARC en 3D, programado en DIANA-FEA

4.3.2 Tipo de elemento panel EFNARC

Los ensayos experimentales han sido simulados mediante un modelo no lineal de elementos en tres dimensiones en DIANA-FEA.

En la FIGURA 4-4 se muestra el modelo estudiado en 3D considerando las dimensiones establecidas de 600mm*600mm*100mm. Los elementos en tres dimensiones pueden tener una interpolación lineal o una interpolación cuadrática dependiendo del número de nodos. Es preferible para mallar el uso de elementos con interpolación cuadrática en el campo de desplazamiento, preferiblemente se debe usar un elemento cuadrático hexaédrico de 20 nodos en 3D para obtener resultados más exactos para el computo de los desplazamientos y tensiones. Las recomendaciones de DIANA-FEA para losas estructurales recomienda un máximo de tamaño de elemento para un modelo 3D entre el min de $l/50$, $b/50$, $h/6$ donde l =largo, b =ancho y h =profundidad respectivamente. En base a estas consideraciones se ha determinado los valores de tamaño de malla para el panel EFNARC y la placa de acero donde se aplica la carga.

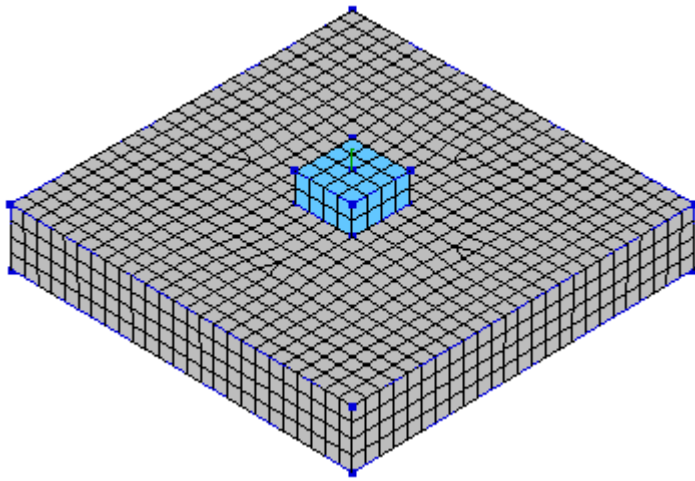


FIGURA 4-4 Modelo numérico de panel EFNARC en 3D, programado en DIANA-FEA

4.3.3 Ecuaciones constitutivas no lineales de los materiales

Al especificar el modelo de comportamiento en tracción del HRFA en el programa utilizado se debe introducir un diagrama tensión – deformación. Las propiedades de los HRFA quedan definidas por el diagrama tensión – apertura de fisura, y por consiguiente se deberá realizar la transformación mediante la longitud característica. En este caso la longitud característica adoptada es $l_{ch} = \sqrt{2} h$, recordando que la relación entre deformación y apertura de fisura a utilizar es la siguiente:

$$\varepsilon = \omega / l_{ch} \quad (4-1)$$

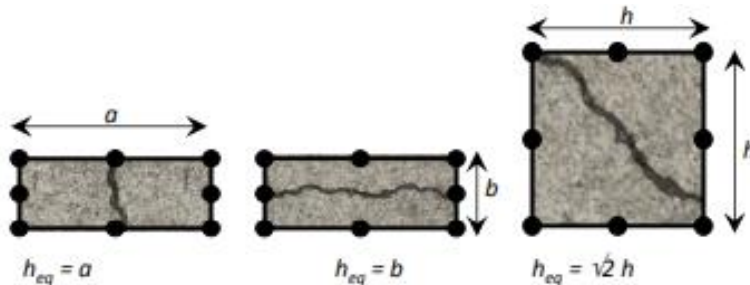


FIGURA 4-5 Longitud equivalente basada en dimensiones de elemento y dirección de grieta: Fuente[27] Guidelines for Nolinear Finite Element Analysis of Concrete Structures.

4.3.3.1 Modelización del acero

Se han utilizado elementos en la interfaz placas de acero y el panel de hormigón en los apoyos y en lugar donde se aplica la carga. El espesor de la placa en el punto donde se aplica la carga es de 100mm*100mm, las características mecánicas se encuentran resumidos en la Tabla 4-1

Tabla 4-1

Propiedades lineales del material acero.

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		ACERO	
Young's modulus	E	200000	N/mm ²
Poisson's ratio	ν	0.3	
Mass density	ρ	0.00E+00	T/mm ³

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2 Modelización del hormigón con fibras

El modelo de hormigón está basado en un modelo constitutivo de deformación total de grieta rotante (total strain based crack model). A continuación, se muestra todos los parámetros introducidos en Diana-Fea para representar el material hormigón Tabla 4-2, Tabla 4-3y Tabla 4-4.

De los datos experimentales se tienen caracterizados 3 tipos de hormigón con fibra 4 Kg/m³, 8Kg/m³ y 12Kg/m³ del mismo tipo de hormigón, por lo tanto, las propiedades lineales, el tipo de modelo de fisuración y el comportamiento a compresión se mantiene, la diferencia se produce en el comportamiento a tracción ya que como mencionamos anteriormente se tiene diferentes residencias residuales en función de la cantidad de fibra, por tal motivo en la Tabla 4-2 y Tabla 4-3 se presenta únicamente el comportamiento a tracción de la caraterizacion de hormigones reforzados 8Kg/m³ y 12Kg/m³ respectivamente. A continuación, se muestra todos los parámetros introducidos en DIANA-FEA para representar el material hormigón.

Tabla 4-2

Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-4kg/m³

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		HORMIGÓN	
Propiedades lineales del material			
Young's modulus	E	38629.09	N/mm2
Poisson's ratio	v	0.15	
Mass density	p	2.40E-09	T/mm3
Total strain based crack model			
Rotating			
Comportamiento a tracción			
Tensile curve	Fib fiber reinforced concrete		
CMOD or strain curve	CMOD		
Uniaxial tensile strength	f _l *	1.74	N/mm2
Uniaxial residual strength	f _{Ri} *	1.98	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.05	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rj} *	0.55	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.5	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rk} *	0.47	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rk} *	2.5	mm
Ultimate crack mount opening*		13.5	mm
Stress factor fiber reinforced concrete model		1	
Poisson´s ratio reduction	Damage model		
Comportamiento a compresión			
Compression curve			Parabólico
Compressive strength	f _{ck}	42	N/mm2
Compressive fracture energy	G _c	36.9043	N/mm
Crack bandwith specification			Govindjee
Residual compressive strength		0	N/mm2
Reduction model		Vecchio and Collins 1993	
Lower bound reduction curve			0.4
Confinement model			No increase

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-3

Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-8kg/m³

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		HORMIGÓN	
Comportamiento a tracción			
Tensile curve	Fib fiber reinforced concrete		
CMOD or strain curve	CMOD		
Uniaxial tensile strength	f _l *	1.78	N/mm2
Uniaxial residual strength	f _{Ri} *	1.98	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.06	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rj} *	1.03	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.5	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rk} *	1.25	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rk} *	2.5	mm
Ultimate crack mount opening*		13.5	mm
Stress factor fiber reinforced concrete model		1	
Poisson´s ratio reduction	Damage model		

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-4

Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras12kg/m³

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		HORMIGÓN	
Comportamiento a tracción			
Tensile curve	Fib fiber reinforced concrete		
CMOD or strain curve	CMOD		
Uniaxial tensile strength	f _l *	1.69	N/mm2
Uniaxial residual strength	f _{Ri} *	1.89	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.15	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rj} *	1.54	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rj} *	0.5	mm
Uniaxial residual strength	f _{Rk} *	2.02	N/mm2
Crack mount opening at	f _{Rk} *	3.2	mm
Ultimate crack mount opening*		13.5	mm
Stress factor fiber reinforced concrete model		1	
Poisson´s ratio reduction	Damage model		

Fuente: Elaboración propia

El valor de la última apertura de la boca de grieta se define mediante la longitud fibras /4, es decir,

13.5mm teniendo en cuenta que la longitud total de la fibra Barchip 54 es de 54mm. Una vez

implementado el comportamiento a tracción del hormigón reforzado en el modelo numérico se procede a realizar el análisis estructural.

4.3.3.3 *Condiciones de contorno*

Para establecer las condiciones de contorno, en este documento, se considera las restricciones de desplazamientos en ciertos puntos de la estructura. Por ejemplo, se restringe de desplazamiento vertical en los apoyos y se ha utilizado resortes que son infinitamente rígidos como muestra la FIGURA 2-1 que simulan el soporte de la estructura; en el resto de los apoyos se ha restringido solo el desplazamiento vertical, de este nodo manteniendo la estructura en equilibrio isostático.

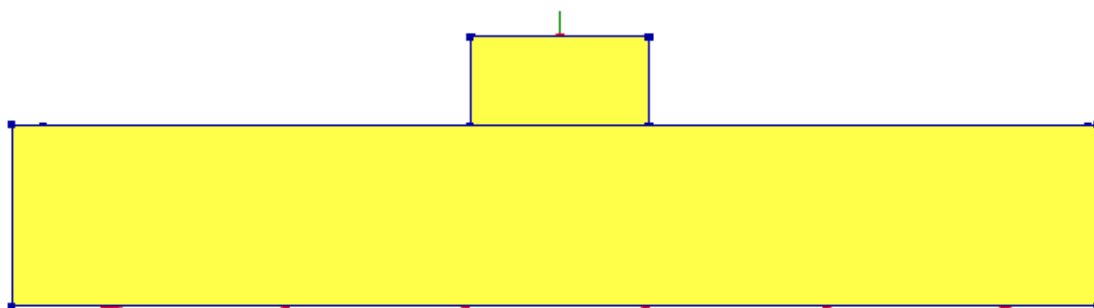


FIGURA 4-6 Detalles de las condiciones de contorno. Fuente: Elaboración propia DIANA-FEA

4.4 CÁLCULO EN DIANA-FEA

En el análisis de elementos finitos no lineal, la relación entre un vector de fuerza y el desplazamiento vector es no lineal. Por varias razones, por ejemplo, en caso de no linealidad de material, la relación se vuelve no lineal, y los desplazamientos a menudo dependen de los desplazamientos en etapas anteriores, en caso de comportamiento material plástico. Al igual que con un análisis lineal, se desea calcular un vector de desplazamiento que equilibra las fuerzas internas y externas. En el caso lineal, el vector solución se puede calcular de inmediato, pero no en el caso no lineal.

Para determinar el estado de equilibrio, no solo hacemos los problemas discretos en el espacio (con elementos finitos), sino también en tiempo (con incrementos). Para alcanzar el equilibrio al final de cada incremento, podemos utilizar un algoritmo de solución iterativa. El equilibrio entre las fuerzas internas y externas debe lograrse iterativamente utilizando un método de Newton-Raphson con un procedimiento de longitud de arco. Un análisis no lineal, en general, dará como resultado una fuerza de desequilibrio entre las fuerzas internas y externas (cargas). El método Newton-Raphson es el procedimiento más utilizado para realizar la iteración de equilibrio y es lo suficientemente preciso y eficiente. Los métodos para realizar este procedimiento interactivo que están disponibles en DIAN-FEA son descritos a continuación:

4.4.1 Método de Newton-Raphson Regular

El método de Newton-Raphson Regular produce una característica de convergencia cuadrática, lo que significa que el método converge a la solución final en sólo unas pocas iteraciones (FIGURA 4-7). [28]. Una desventaja es que la matriz de rigidez tiene que ser establecida en cada iteración y, si se usa un programa de solución directa para resolver el conjunto de ecuaciones lineales, la descomposición de la matriz que consume mucho tiempo debe realizarse en cada iteración. Por otra parte, la convergencia cuadrática sólo se garantiza si se utiliza una matriz de rigidez correcta y si la predicción está cerca de la solución final, caso contrario, el método falla fácilmente debido a la divergencia. [20]

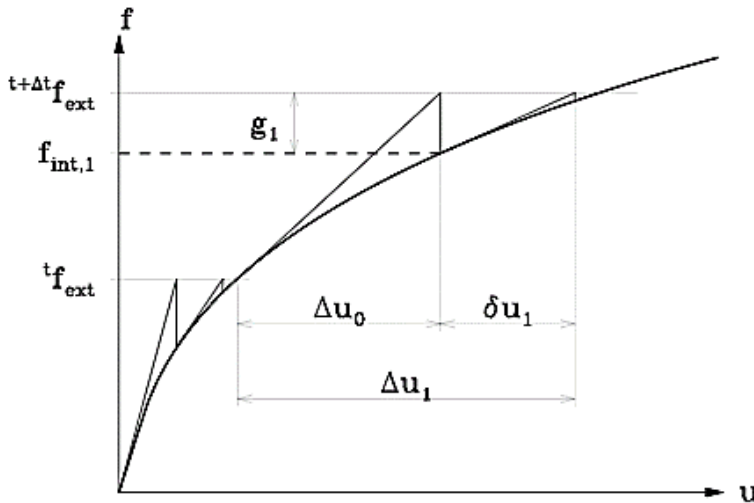


FIGURA 4-7 Iteración con el modelo Newton-Raphson Regular. Fuente: DIANA-FEA

4.4.2 Método de Newton-Raphson modificado.

El método de Newton -Raphson modificado sólo evalúa la relación de rigidez al inicio del incremento FIGURA 4-8. [28]. Por lo general, Newton-Raphson modificado converge más lentamente al equilibrio que Newton-Raphson regular. El método modificado de Newton-Raphson necesita más iteraciones, pero cada iteración es más rápida que en Newton-Raphson regular. En situaciones donde el Newton-Raphson regular ya no converge, el proceso Newton-Raphson modificado puede converger. Esto significa que la predicción se basa siempre en un estado de equilibrio convergen.

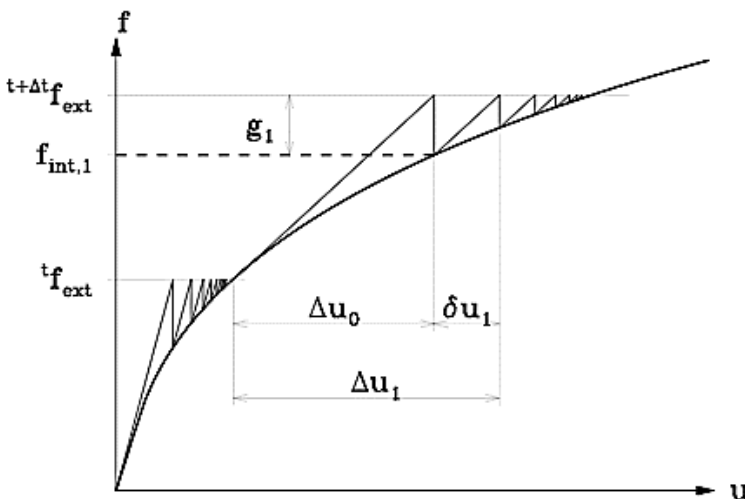


FIGURA 4-8 Iteración con el modelo Newton-Raphson Modificado. Fuente: DIANA-FEA

4.4.3 Método de la rigidez lineal o constante (linear and constant Stiffness)

Los métodos de iteración de rigidez lineal y constante se pueden usar si los otros métodos se vuelven inestables o si es deseable mantener ciertas características. El método de iteración de rigidez lineal utiliza la matriz de rigidez lineal todo el tiempo. Potencialmente, este método tiene la convergencia más lenta, pero cuesta menos tiempo por iteración ya que la matriz de rigidez necesita configurarse solo una vez. El método de rigidez lineal suele ser muy robusto, pero es muy posible que siga caminos de equilibrio inestables después de las bifurcaciones.[20]

El método de rigidez constante utiliza la matriz de rigidez dejada por el incremento anterior. Esto significa que si las iteraciones de Newton-Raphson se utilizan durante la primera fase de un análisis y las iteraciones de rigidez constante en una segunda fase, la rigidez en esta última será igual a la última rigidez calculada en la primera. El método de rigidez constante se puede usar si los métodos Newton-Raphson fallan después de varios incrementos exitosos.

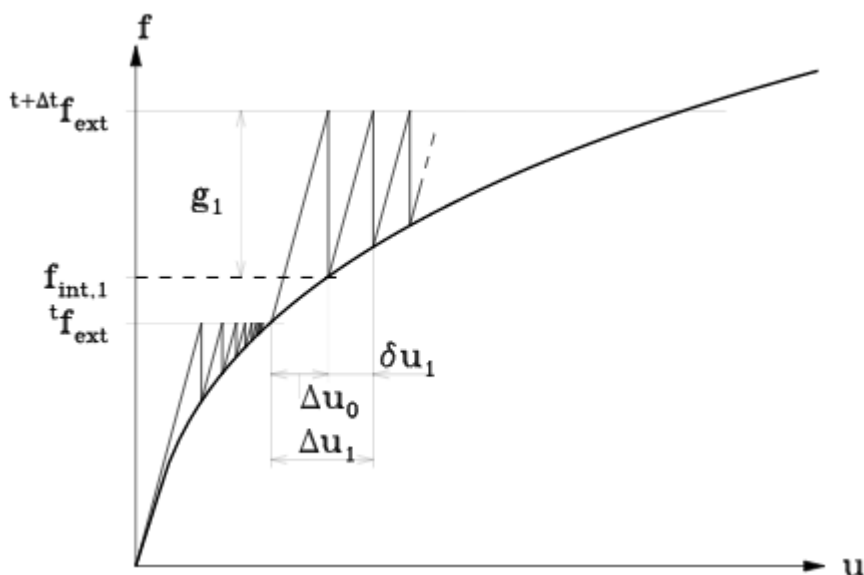


FIGURA 4-9 Iteración con el método rigidez inicial. Fuente: DIANA-FEA

4.4.4 Método de longitud de arco (Arc-Length)

En un proceso de iteración ordinario, las predicciones para los incrementos de desplazamiento pueden llegar a ser muy largos. Este es el caso especialmente si la curva de carga-desplazamiento es casi horizontal. Si ese prescribe un fijo incremento de carga, esto da como resultado grandes predicciones para los desplazamientos. Este problema puede superarse con el uso de un método de longitud de arco. El método de longitud de arco limita la norma de los desplazamientos incrementales a un valor prescrito. Esto se hace mediante la adaptación al mismo tiempo el tamaño del incremento. El tamaño es adaptado dentro del proceso de iteración y no se fija en el momento en que inicia el incremento(FIGURA 4-10)

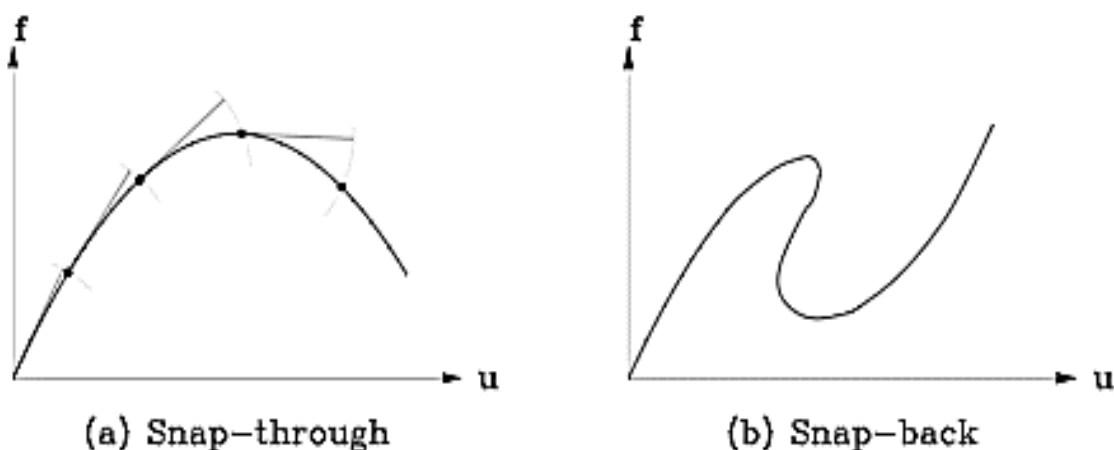


FIGURA 4-10 Longitud de arco . Fuente: DIANA-FEA

4.4.5 Incremento de carga

Para el modelo en estudio se han realizado el caso de carga en función de la deformación prescrita, es decir se coloca los datos para llegar a la deformación central de 25mm.

Los desplazamientos fijos o prescritos, llamadas cargas de deformación, se definen para una o más variables nodales de restricción o grados de libertad. Estos grados de libertad deben identificarse como grados de libertad de restricción, para asegurarse de que el grado de libertad de

desplazamiento fijo se considere como una variable nodal de restricción. La FIGURA 4-11 muestra un ejemplo de la configuración del ensayo para el caso de la aplicación de la carga en el centro del panel de EFNARC. DIANA-FEA recomienda utilizar entre el 1% y 5% de la deformación final.

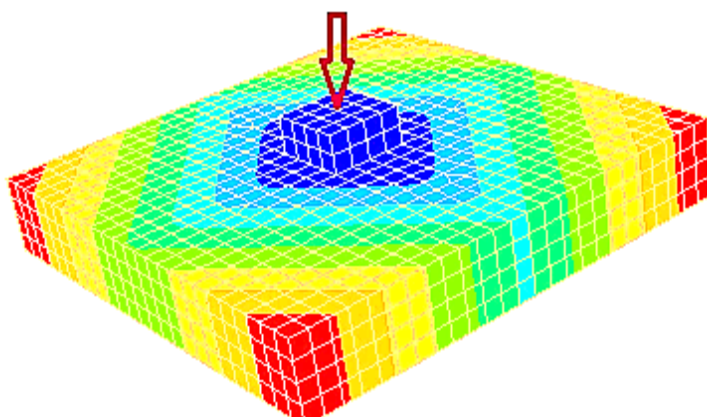


FIGURA 4-11 Ubicación de la carga en el centro del panel EFNARC. Elaboración propia DIANA-FEA

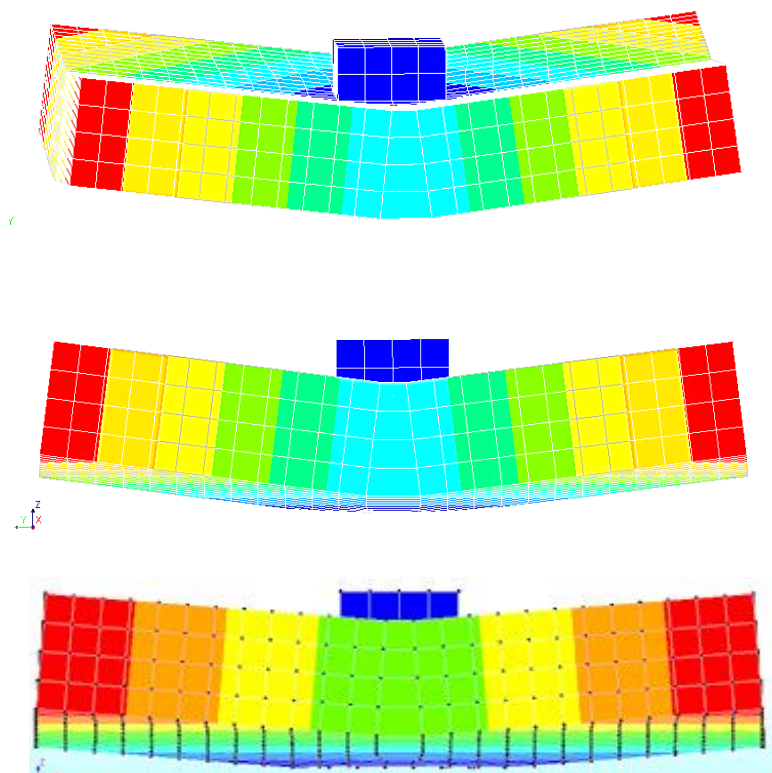


FIGURA 4-12 Comportamiento de la carga en el centro del panel EFNARC. Elaboración propia DIANA-FEA

Para lograr la deformación deseada en el ensayo se usó el 2.5% de la deformación total dando como resultado una deformación prescrita de 0.625 en dirección vertical, sumado al número de pasos utilizados para conseguir reproducir el ensayo y llegar a una deflexión central de 25mm.

4.4.6 Criterio de convergencia

En la aplicación de la carga se utiliza el método de Newton-Raphson con un máximo de 50 iteraciones. Se usa un criterio de convergencia adecuado para determinar el equilibrio, se utiliza la norma de energía junto con una norma de fuerza; ya que una norma basada en desplazamientos no es la más adecuada. Aunque no hay consenso sobre la tolerancia que debe usarse, para el tipo de análisis al que están destinadas estas pautas, se sugieren las tolerancias de convergencia igual a 1×10^{-3} , 1×10^{-2} y 1×10^{-2} para la energía, la fuerza y el desplazamiento, respectivamente. Así mismo, se han utilizado 180 pasos de incrementos de carga. Por otro lado, se consideró que el análisis continuara, incluso si los criterios de convergencia no estuviesen satisfechos.

En conclusión, en el presente capítulo queda resumido las propiedades necesarias para el análisis, es decir, la discretización del elemento, tipo y tamaño de malla, cargas, condiciones de contorno, el método de iteración, los criterios de convergencia y parámetros del material hormigón y acero.

CAPITULO 5.

COMPARATIVA NUMERICO-EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCIÓN

Determinados todos los parámetros iniciales considerados para la modelización numérica del panel EFNARC resumidas en los capítulos anteriores 3 y 4, se procedió a analizar las variables que determinan el comportamiento de rotura a flexión del hormigón reforzado con fibras y validar el modelo de la manera más aproximada al modelo real ensayado, finalizado el estudio se comparan las variables más importantes en el hormigón en estado fisurado.

El análisis en este capítulo está centrado a determinar la influencia de los diferentes parámetros que definen el comportamiento tensional a través del modelo constitutivo. El objetivo principal es estudiar opciones de análisis no lineal y comparar los resultados numéricos con los experimentales en términos de desplazamientos, deformaciones y fisuración a lo largo de toda la respuesta estructural bajo carga creciente hasta una deflexión central a 25mm.

Este capítulo proporciona los resultados obtenidos en el modelo numérico, así como en el modelo experimental ensayado y establece la comparación y diferencias de ambos en términos de desplazamientos, resistencia a tracción del hormigón, posteriormente se realiza el estudio paramétrico de las variables más influyentes del modelo validado en términos de la energía de tensión, deformación, el tipo de modelo de fisura, el ancho de banda de fisura, etc.

5.2 ANALISIS DE CARACTERIZACIÓN EN VIGAS

Previamente a la comparación de resultados en el panel EFNARC, cabe recalcar que en la tesina se realizó ensayos en vigas, que sirvieron de base para la caracterización del material.

El primer ensayo de viga se encuentra explicado de manera más extensa en el Anejo 1 y que sirvió de punto de partida para los ensayos posteriores, donde, se ensayaron vigas en elementos bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) . En las vigas 2D y 3D se realizaron modelos con los datos obtenidos en función de la resistencia residual para hormigones dosificados en 4 Kg/m^3 , 8 Kg/m^3 y 12 Kg/m^3 como se explica en el capítulo 3 de este trabajo, obteniendo resultados como la deformación central, el CMOD, reacción y la curva carga-deformación de las 3 cuantías de hormigón con fibras respectivamente. De igual manera a continuación en la FIGURA 5-1 se presenta las curvas Carga vs CMOD, donde se puede observar el comportamiento del hormigón reforzado con fibra Barchip 54 con respecto a la cantidad de cuantía de fibra resultado del modelo numérico en DIANA-FEA, verificándose una vez más que a mayor cantidad de fibra es mejor la respuesta estructural el hormigón reforzado. En la FIGURA 5-2 se puede observar el comportamiento Carga-CMOD de los ensayos experimentales en hormigones reforzados con fibra con fibra Brachip 54.

Básicamente se observa que el comportamiento Carga-CMOD del ensayo experimental como de la modelación numérica, estas presenta similitudes aceptables en su comportamiento, por lo tanto, queda claro que la caracterización del material hormigón reforzado con fibras Barchip 54 para diferentes cuantías de fibra se encuentra correctamente caracterizado.

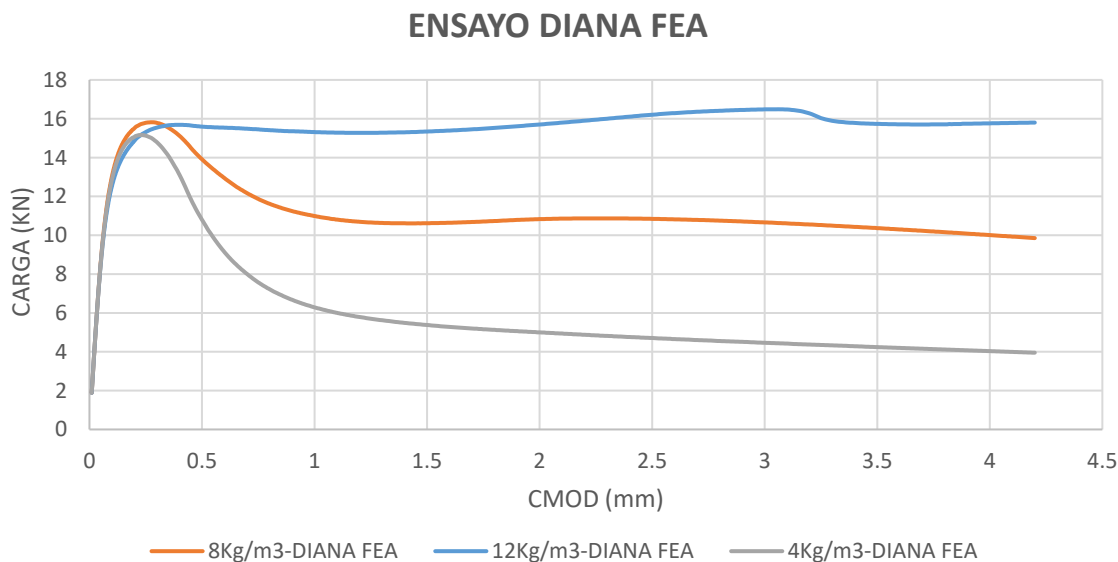


FIGURA 5-1 Carga-CMOD de vigas caracterizadas con hormigón reforzado don fibras Barchip 54 En DIANA FEA. Elaboración propia

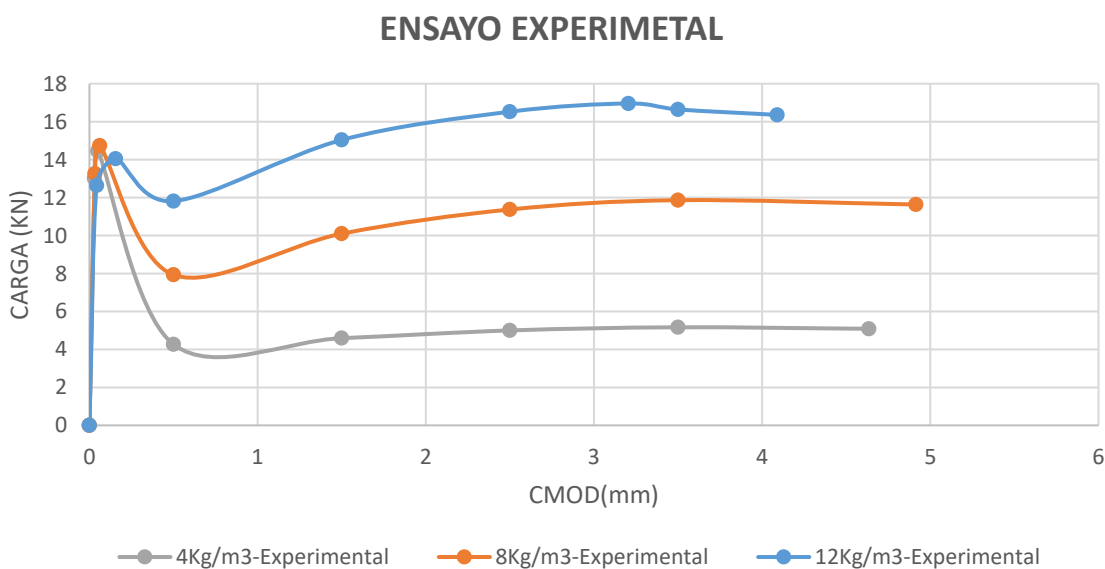


FIGURA 5-2 Carga-deformación de vigas caracterizadas con hormigón reforzado don fibras Barchip 54 Experimentales Elaboración propia DIANA-FEA

Otro aspecto importantes es la relación entre la deformación y el CMOD, en la FIGURA 5-4 podemos observar la deformación total que se produce en cada una de las vigas ensayadas, de igual manera en laFIGURA 5-5 podemos observar el ancho de grieta, verificándose una vez más que la relación deformación-CMOD para esta serie de ensayos es correcta (FIGURA 5-3).

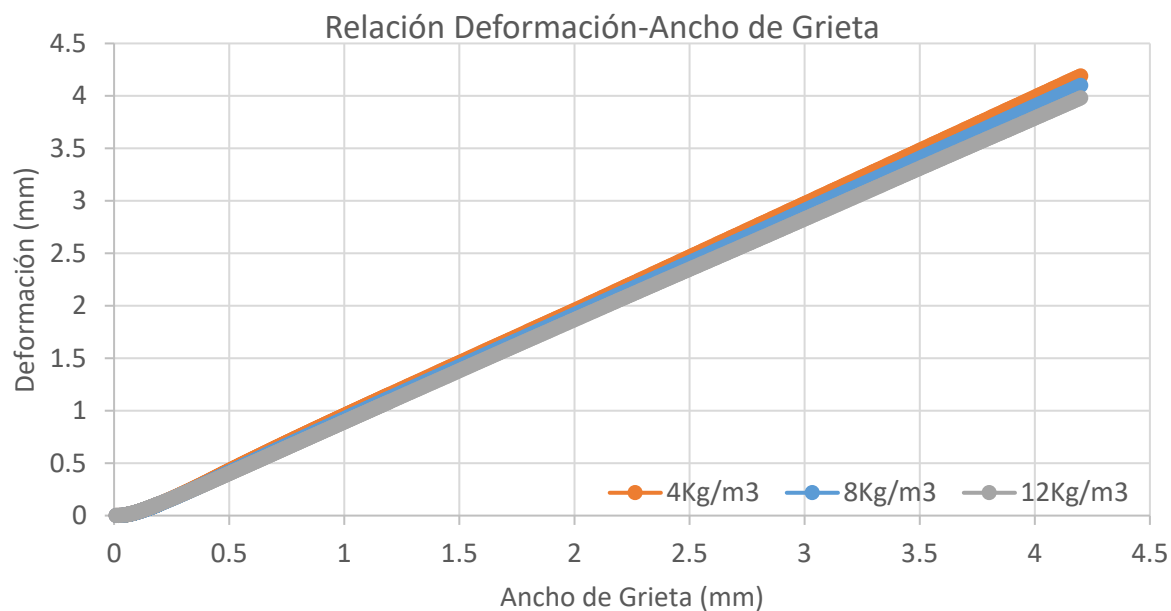


FIGURA 5-3 Relación Deformación-Ancho de Grieta con fibras Barchip 54 de 4 g/m³ -8 g/m³ -12Kg/m³ respectivamente. Elaboración propia DIANA-FEA

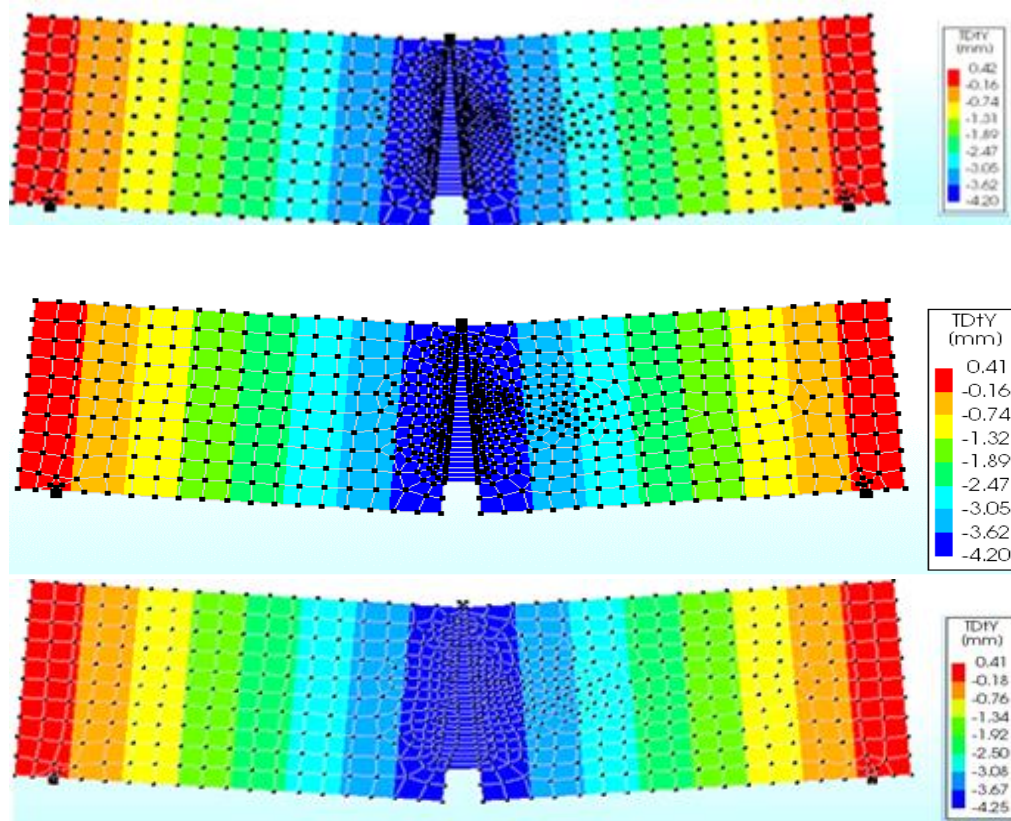


FIGURA 5-4 Deformación de vigas con fibras Barchip 54 de 4 g/m³ -8 g/m³ -12Kg/m³ respectivamente. Elaboración propia DIANA-FEA

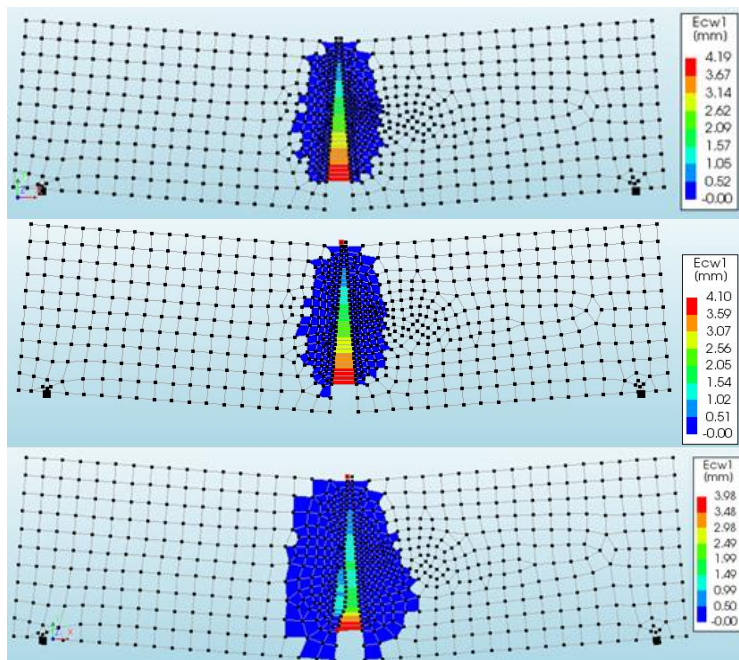


FIGURA 5-5 Ancho de grieta de vigas con fibras Barchip 54 de 4 g/m^3 - 8 g/m^3 - 12 Kg/m^3 respectivamente.

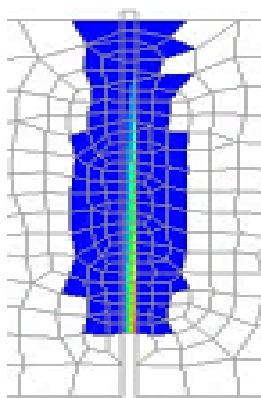
Elaboración propia DIANA-FEA

De manera resumida podemos observar el estado tensional que presentan las vigas, con las diferentes cuantías de fibra de acero. Los parámetros, condiciones de contorno, tipo y tamaño de elemento, número de pasos y criterios de convergencia de las vigas están detallados en el Anejo 1 puesto que, al tratarse de un ensayo de vigas, se mantiene el procedimiento cambiando los valores de la ecuación constitutiva para cada una de las cuantías.

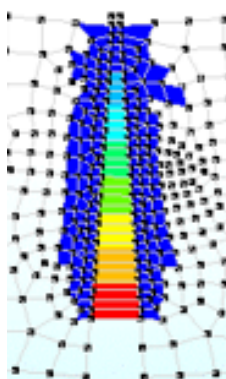
La importancia de realizar en el análisis en vigas se centró básicamente en poder definir parámetros importantes para modelación en 3D de panel EFNARC, a continuación de presentan algunas conclusiones del análisis en vigas.

- ✓ El análisis numérico en 2D y 3D de la prueba de flexión en tres puntos, muestra la relación existente entre la deflexión y ancho de banda; en los modelos de viga se calibraron parámetros hasta llegar a obtener relaciones que estén acorde a la literatura técnica, donde, a grandes rasgos la relación ancho de banda es aproximadamente la deformación partido por dos, en la FIGURA 5-3 se puede observar que cumple dicho criterio.

- ✓ Los parámetros de la ecuación constitutiva están en función de lo determinado por el fib Model Code, introducido en diana en función de las resistencias residuales de diseño.
- ✓ Al momento de ensayar vigas, se pudo ver la gran influencia que tiene el lugar donde se coloca la carga en función de una deformación prescrita, puesto que en los ensayos se colocó la carga de una manera asimétrica con proyección sobre una línea, que en teoría debía producir un desplazamiento simétrico, el cual se logra pero al medir el ancho de banda se observa que se abre de manera no simetría, por lo tanto, se colocó la misma deformación prescrita en los puntos que simulan el bloque de acero que aplica la carga obteniendo como resultado final una deformación y un ancho de banda simétrico como se muestra a continuación;



(a) Asimétrico



(b) Simétrico

FIGURA 5-6 Comportamiento tensional de la zona fisurada. Elaboración propia DIANA-FEA

- ✓ Cabe recalcar que un modelo en 2D y 3D, aunque se modele el mismo ensayo tiene un proceso de análisis muy diferente, existen ciertas condiciones de contorno que cambian de manera sustancial el análisis. Uno de los criterios a tomar en cuenta es la interface del elemento, en el análisis en 2D se utilizan líneas que simulan la interface hormigón-acero siendo necesario definir el ancho del elemento; en un modelo 3D hay que tener cuidado en este parámetro, una de las opciones es utilizar la superficie total de contacto o través de líneas donde se tiene que verificar de manera adecuada la dirección de la rigidez ya que

puede arrojar resultados completamente diferentes. Este fenómeno se observó de manera más detallada en uno de los ensayos donde debido a una mala interface hormigón-acero la deformación no se producía en toda la viga sino únicamente en bloque de acero donde se aplica la carga, es decir no existía transmisión de carga a la viga de hormigón.

- ✓ Los soportes también juegan un papel importante en las diferentes modelaciones, hay que tomar en cuenta que en el modelo 2D se coloca soportes que restringen en moviendo sea horizontal o vertical en un punto en específico, que colocando el ancho simula el soporte de una manera adecuada, en el modelo 3D se debe tener cuidado al colocar los puntos de soporte y verificar que estén simulando la acción de acuerdo el ensayo experimental.
- ✓ Finalmente realizar estos ensayos ayudo a tener una idea mas clara de como se debe comportar el hormigón con fibras, sobre todo es de gran importancia la correcta caracterización del material, pues es un parámetro importante para simular el panel EFNARC en 3D. A continuación se presentan una tablaa donde se compara entre los datos experimentales y el ensayo realizo en DIANA-FEA la carga última que soporta el hormigón antes de que la fibra empiece a trabajar.

Tabla 5-1

Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-4kg/m³

CARGA MÁXIMA (KN)	
Experimental	DIANA-FEA
14.45	15.82
14.74	15.16
14.05	15.69

Elaboración propia

5.3 COMPARACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE LOS RESULTADOS

PANEL EFNARC

Una vez caracterizadas las vigas , se procede a realizar el modelo numérico del panel EFNARC, los resultados presentados son de un panel dosificado con la mínima cuantía de fibra, se muestra la respuesta de los ensayos experimentales y numéricos.

Por una parte, se comparan los resultados numéricos y experimentales en cuanto a diagramas carga- deflexión en la parte central del panel, mientras que por otro lado se presentan los resultados graficos y numéricos de tensiones y deformaciones.

En este apartado se describen los resultados obtenidos para un panel EFNARC simulado con la cuantías de 4Kg/m^3 , 8Kg/m^3 y 12Kg/m^3 , y se deja como precedente para futuras investigaciones la caracterización del material, que como se puede observar gráficamente produce su respuesta tensional es mayor, puesto que resisten cargas mas grandes debido a la mayor cantidad de fibra en su dosificación que resulta en un proceso de fisuración diferente.

5.3.1 Comparativa carga-desplazamiento experimental 4kg/m^3 DIANA-FEA

Se procede a realizar la comparación entre los resultados numéricos y experimentales relativos a los diagramas carga-desplazamiento, obtenidos en el centro panel, para comparar el hormigón dosificado con esta cuantía, se cuenta con resultados de dos campañas experimentales, donde, la carga última para un hormigón dosificado de 4kg/m^3 del ensayo experimental 1 resulto ser de 39.93KN y 50.22 del ensayo experimental 2, en el caso del modelo numérico este se sometió a un análisis de convergencia por carga, con una carga ultima de 51.84kN . La Tabla 5-2 muestra el valor predicho de la carga última resistida por el panel. Se observa que el valor del resultado experimental es semejante al desarrollado por DIANA-FEA.

Tabla 5-2

Comparación numérica-experimental Carga en función de la deformación Hormigón-4kg/m³

RESULTADOS DE CARGA(KN) CON 4KG DE FIBRA			
DEFORMACIÓN [MM]	EXPERIMENTAL 1	EXPERIMENTAL 2	DIANA-FEA
0	0,00	0,00	0,00
1	18,40	21,37	<u>51,84</u>
2	30,66	32,99	40,49
3	35,56	<u>50,22</u>	37,04
4	38,80	37,95	36,12
5	<u>39,93</u>	39,24	35,30
6	39,00	37,62	34,46
7	39,56	36,13	33,53
8	39,71	35,72	32,52
9	39,18	35,63	31,47
10	38,19	35,41	30,38
11	37,00	35,78	29,23
12	36,27	34,18	28,04
13	35,30	33,38	26,79
14	34,42	32,77	25,57
15	33,33	30,41	24,47
16	32,44	29,75	23,39
17	31,32	29,08	22,47
18	30,21	27,57	21,60
19	29,46	26,61	20,85
20	28,49	26,11	20,15
21	27,38	23,60	19,48
22	26,47	23,10	18,86
23	25,68	22,29	18,32
24	24,61	20,94	17,85
25	23,46	19,81	17,41

Elaboración propia

La fractura del panel inicia dentro de los 5 mm de deflexión, donde el panel alcanza su máxima resistencia, posteriormente empieza a decrecer de manera gradual hasta los 25mm de deflexión como se observa en la FIGURA 5-7.

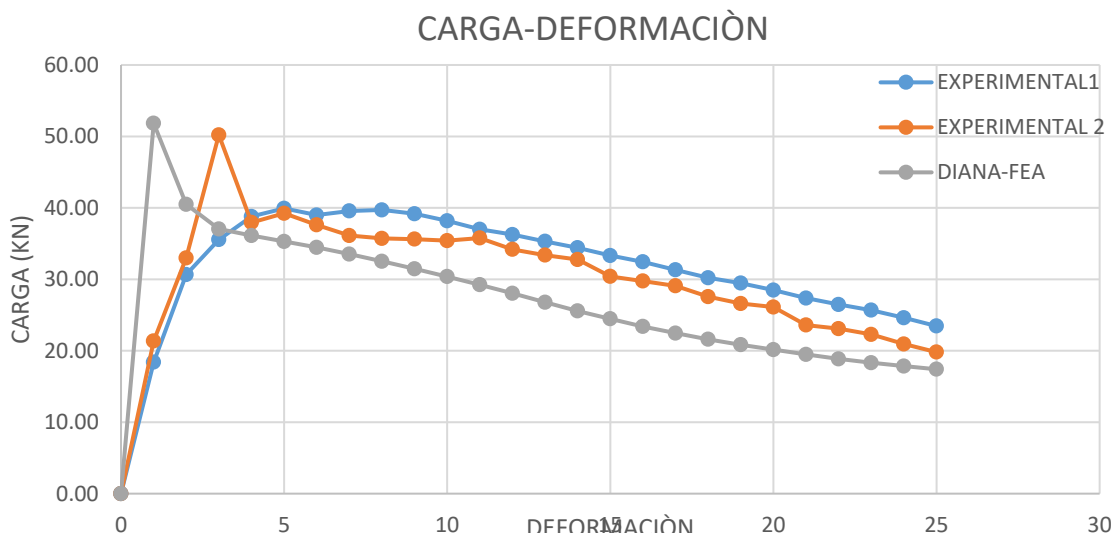


FIGURA 5-7 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4kg/m³.

Fuente: Elaboración propia

Se puede decir que el modelo analítico tiene una aproximación aceptable en términos de carga-deformación, sin embargo, es necesario acoplar bien al comportamiento inicial del hormigón reforzado con fibra a la del modelo experimental. El modelo numérico presenta una carga de fisuración algo mayor al experimental. No obstante, la principal diferencia reside en el desplazamiento en que se obtiene la carga pico. En el modelo numérico dicho desplazamiento es de 1 mm mientras que en el experimento 2 es de 3 mm. Este decalaje de 2 mm puede ser debido a una cierta falta de rigidez del equipo de ensayo, principalmente del marco de sorporte..

Se observa que la resistencia residual que, es aquella que, mantiene el hormigón una vez fisurado, es menor a los ensayos experimentales, si nos fijamos como evoluciona la resistencia desde el inicio del ensayo hasta que finaliza, se observa el aumento de resistencia sin aumento de fisura hasta llegar a la carga máxima del ensayo, a partir de ese instante empiezan aparecer las primeras fisuras y la resistencia del material empieza a decrecer a medida que la fisura aumenta y, por lo tanto las fibras empiezan a trabajar. Si se trasladara el pico numérico de resistencia hasta el pico experimental las resistencias residuales (postpico) serían sensiblemente más parecidas. No obstante, las numéricas seguirían siendo menores. Por tanto, algún otro aspecto está reduciendo la

resistencia residual. Es de suponer que dicho aspecto sea la no simulación del rozamiento entre el hormigón y el acero del marco a medida que la flecha aumenta. Este rozamiento incrementaría la resistencia residual.

5.3.2 Comparativa Energía-desplazamiento experimental 4kg/m³ DIANA-FEA

Tabla 5-3

Comparación numérica-experimental Energía vs deformación Hormigón-4kg/m³

RESULTADOS DE ENERGIA(KN) CON 4KG DE FIBRA			
DEFORMACIÓN [MM]	EXPERIMENTAL 1	EXPERIMENTAL 2	DIANA-FEA
0	0,00	0,00	0,00
1	9,20	10,69	25,92
2	33,73	37,87	72,09
3	66,84	79,47	110,86
4	104,02	123,55	147,44
5	143,38	162,15	183,15
6	182,84	200,57	218,03
7	222,12	237,45	252,03
8	261,75	273,37	285,05
9	301,19	309,04	317,04
10	339,88	344,56	347,97
11	377,47	380,16	377,78
12	414,10	415,14	406,42
13	449,89	448,93	433,83
14	484,75	482,00	460,01
15	518,62	513,59	485,03
16	551,50	543,67	508,96
17	583,38	573,08	531,89
18	614,15	601,41	553,93
19	643,98	628,50	575,15
20	672,96	654,86	595,65
21	700,89	679,71	615,47
22	727,82	703,06	634,64
23	753,89	725,75	653,23
24	779,04	747,37	671,32
25	803,07	767,74	688,96

Elaboración propia

La FIGURA 5-8, representa la curva energía-deformación y muestra que el ensayo numérico tiene una energía menor a las experimentales, entonces según las especificaciones “European Specification For Sprayed Concrete”, la clasificación de Tenacidad con respecto a la energía de absorción obtenida del ensayo de Panel cuadrado EFNARC es de tenacidad Clase C para los ensayos Experimentales y Clase B para el modelo en Diana-Fea.

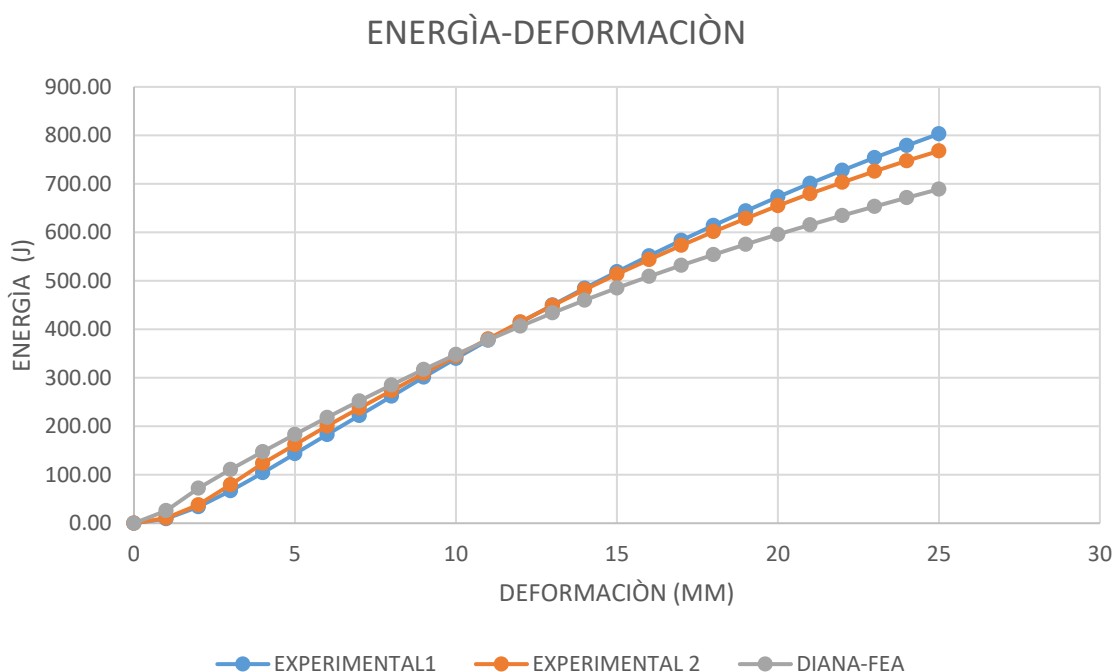


FIGURA 5-9 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4kg/m³.
Fuente: Elaboración propia

La comparación en términos de energía muestra que para valores avanzados de la deformación la energía obtenida en el modelo numérico es inferior a la obtenida en los experimentos. Ello es consistente con lo visto en los diagramas carga desplazamiento, donde la carga del modelo numérico es inferior para deformaciones avanzadas. También en este caso, esta energía que “falta” podría ser la producida por el rozamiento entre la cara inferior del panel y el marco de acero, que no se considera en el modelo numérico.

5.3.2.1 Desplazamiento central.

El panel EFNARC simulado llega en su parte central a deformación de 25mm), no obstante, a pesar de que presenta un comportamiento similar al comportamiento experimental real (FIGURA 5-10), donde, existe un hundimiento de la parte central y un ligero levantamiento hacia los bordes, la deformación en cierto punto pierde simétrica en dirección horizontal X-Y, existe mayor deformación en el plano X y menor en plano Y. A la vista de ello, será necesario profundizar en el estudio del efecto del tamaño de malla y de las condiciones de los resortes de apoyo.

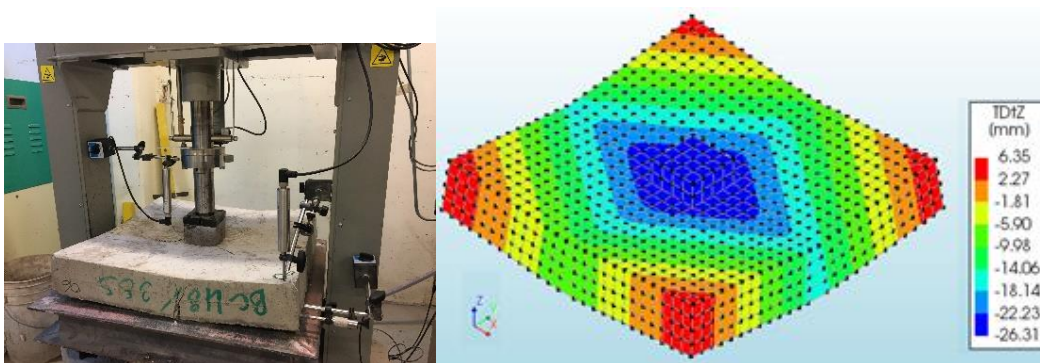


FIGURA 5-11 Comprativa-Experimental-Diana FEA Deformación en el panel EFNARC-4kg/m³.
Fuente: Elaboración propia

5.3.2.2 Propagación y Separación entre fisuras-4Kg/m³

A medida que se aumenta la carga, se observa las primeras fisuras (FIGURA 5-12), en este caso va aumentando el ancho de fisura que se produce debido a los esfuerzos de flexión, en el apartado (a) el hormigón todavía no ha fisurado, es la primera puesta en carga, en el apartado (b) se muestra la fisura producida por la carga última que soporta el panel y finalmente en (c), la fisuración total que tiene el ensayo.

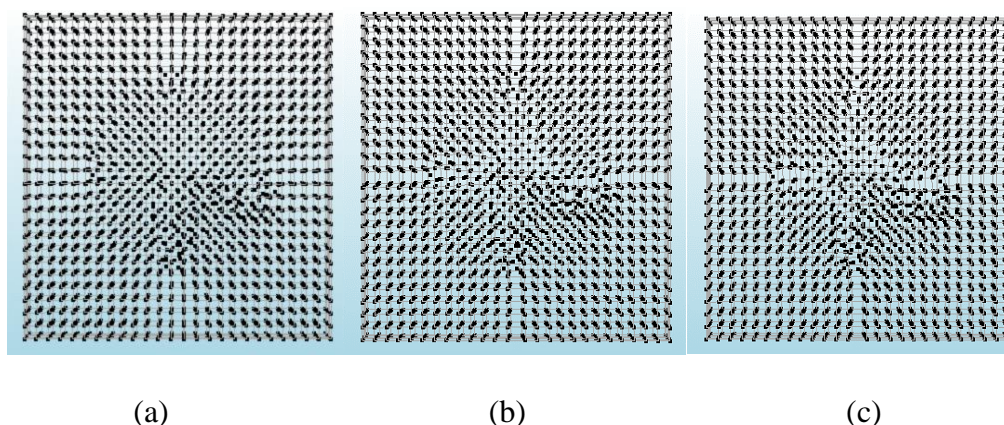


FIGURA 5-13 Propagación de la fisuras en el panel EFNARC- DIANA FEA-4kg/m³. Vista en Planta

Fuente: Elaboración propia

Las fisuras existentes en el panel modelizado numéricamente coincide con los resultados experimentales, donde, se puede apreciar que, para bajas cuantías de fibras, en este caso 4Kg/m³, la falla se produce por flexión, con la formación de dos grietas perpendiculares como se muestra en FIGURA 5-14. Se muestra el patrón y el ancho de fisuración bajo la carga característica - experimental y predicho por el modelo numérico.

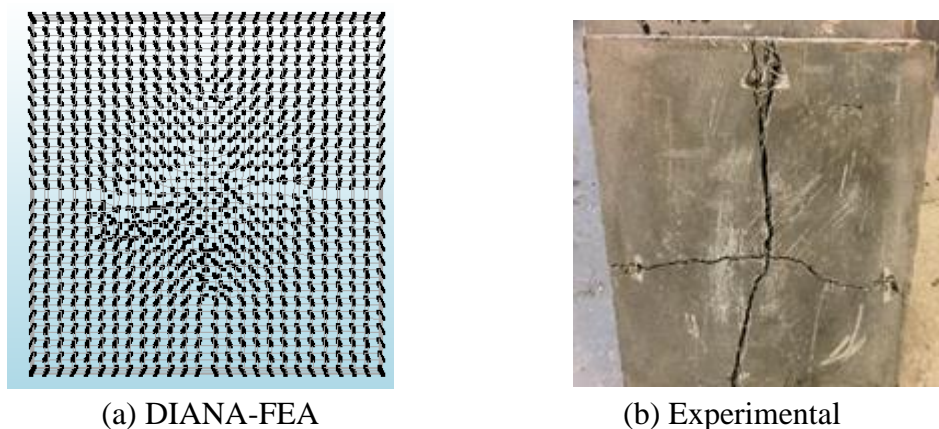
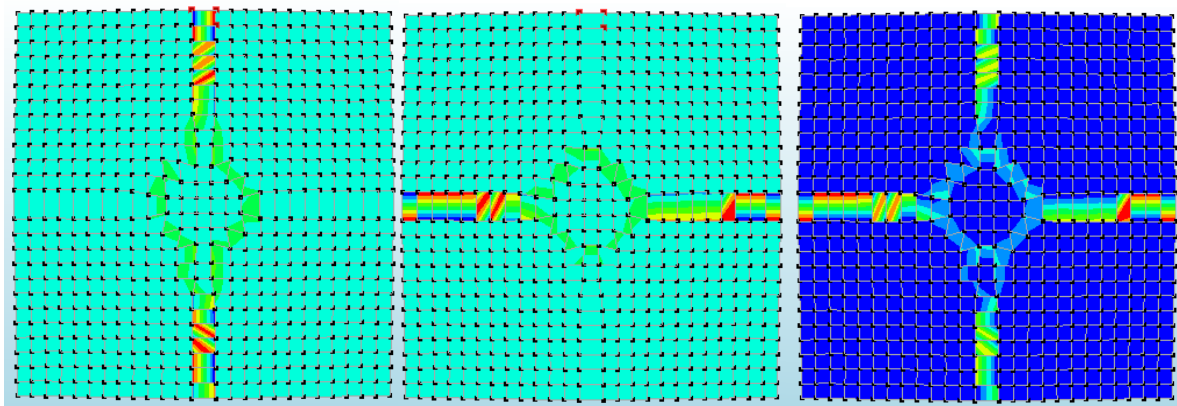


FIGURA 5-15 Fisuración el panel EFNARC- DIANA FEA-4kg/m³. Vista en Planta

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.3 Mapa de fisuración

En la Figura XX e presenta el mapa de fisuración y el ancho de banda que se produce en el estudio; así mismo, el patrón de fisuras generado en dirección horizontal X-Y.



a) Eje x-x

(b) Eje y-y

(c) Total

FIGURA 5-16 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-4kg/m³. Vista en Planta

Fuente: Elaboración propia

El ancho de banda de la fisura, es diferente para el plano en X-X y Y-Y, se ha medido la separación total en ambas igual a los valores de la Tabla 5-4.

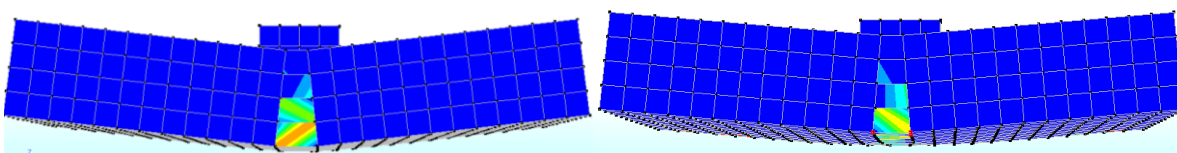
Los puntos medidos en la parte inferior del panel como se aprecia en la FIGURA 5-17 se resumen en la tabla a continuación, en este caso para una deformación impuesta de 25mm arroja una abertura de grieta, como se ve a continuación:

Tabla 5-4

Ancho de Grieta medido en panel EFNARC- Hormigòn-4kg/m³

DEFORMACIÓN	APERTURA DE GRIETA		
25mm	a)	19.27 mm	EJE X-X
	b)	25.75mm	EJE Y-Y

Elaboración propia



a) Eje x-x

(b) Eje y-y

FIGURA 5-17 Separacion de fisuras diagonales para un EFNARC- DIANA FEA-4kg/m³. Vista en Frontal

Fuente: Elaboración propia

5.3.2.4 Tensiones y deformaciones 4Kg/m3

Se han obtenido los resultados tenso-deformacionales del modelo en DIANA-FEA, donde se observa las zonas mas solicitadas, que a simple vista coincide con los lugares donde se precude las fisuras. Las mayores tensiones se concentran en el centro del elemento (lugar de transmisión de carga) y alrededor de las zonas donde se produce la fisuras diagonales hasta llegar a los bordes del elemento a pesar de eso se observa que las tensiones no son simétricas en dirección horizontal X-X y Y-Y.

Tensiones principales

En la FIGURA 5-18 se aprecia las tensiones principales máximas para el instante después de la aplicación de la carga. Se presenta el riesgo de grieta en los lugares mas tensionados.

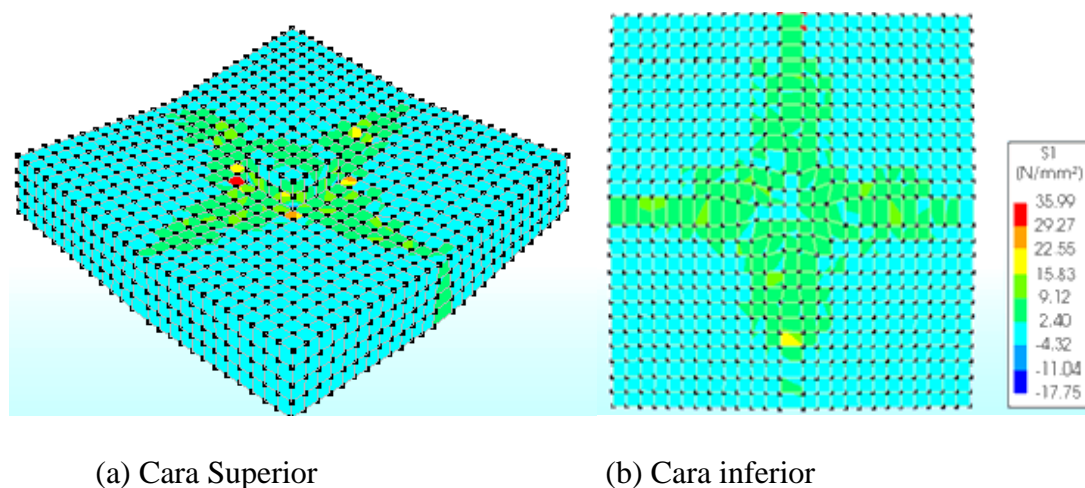
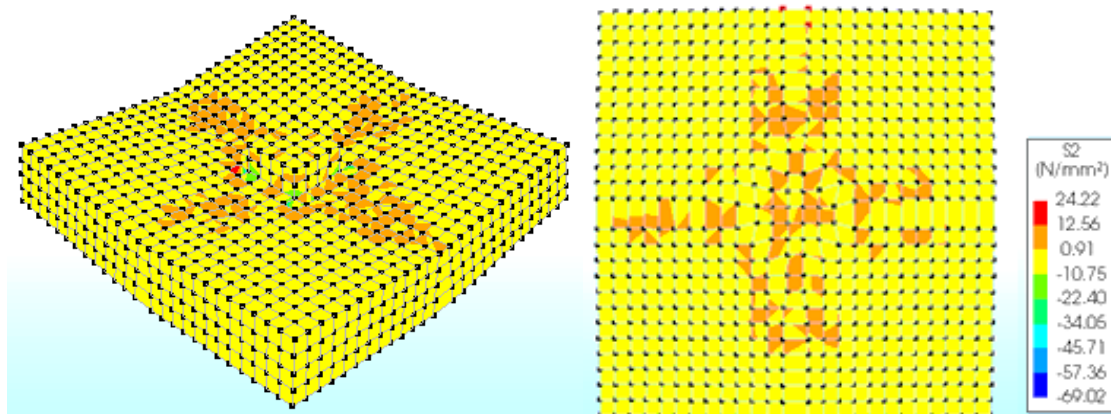


FIGURA 5-18 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA

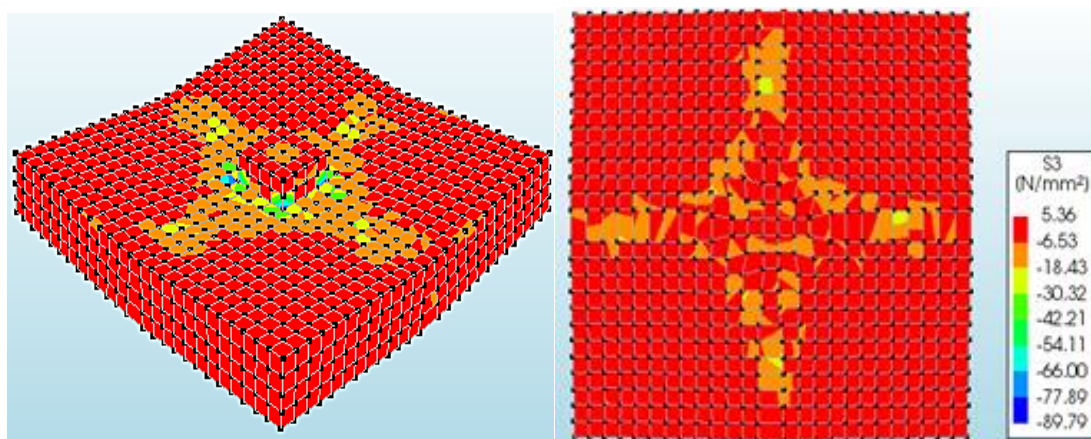
Presentamos las tensiones principales mínimas en el panel a la carga máxima. Podemos observar el aplastamiento de hormigón cerca del área de aplicación de carga.



(a) Cara Superior

(b) Cara inferior

FIGURA 5-19 Mínima Tensión Principal S2. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA



(a) Cara Superior

(b) Cara inferior

FIGURA 5-20 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA

En la FIGURA 5-20 se puede observar que el panel está sometido a compresión triaxial, esto debido a que los esfuerzos se producen a lo largo de los ejes distintos en dirección perpendicular, de donde se aplica la carga vertical.

5.3.3 Comparativa carga-desplazamiento experimental 8kg/m³ DIANA-FEA

Tabla 5-5

Comparaciòn numérica-experiemntal Carga vs Deformaciòn y Energía vs Deformaciòn
Hormigòn-8kg/m³

RESULTADOS DE CARGA(KN)			RESULTADOS DE ENERGIA(KN)	
DEFORMACIÓN [MM]	EXPERIMENTAL 1	DIANA- FEA	EXPERIMENTAL 1	DIANA- FEA
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	26.84	46.40	13.42	23.20
2	36.80	52.90	45.24	72.85
3	48.10	53.47	87.69	126.03
4	52.83	50.70	138.15	178.12
5	55.14	47.26	192.13	227.10
6	54.21	44.49	246.81	272.98
7	55.42	43.62	301.62	317.03
8	55.47	42.58	357.07	360.13
9	53.87	41.45	411.74	402.15
10	52.41	40.26	464.88	443.00
11	50.74	39.00	516.45	482.63
12	48.71	37.67	566.18	520.97
13	46.91	36.27	613.99	557.94
14	44.47	34.85	659.68	593.50
15	42.49	33.58	703.16	627.72
16	40.90	32.31	744.85	660.67
17	39.60	31.24	785.10	692.44
18	38.21	30.20	824.01	723.16
19	37.03	29.29	861.63	752.91
20	35.77	28.47	898.03	781.79
21	34.55	27.69	933.19	809.87
22	33.57	26.95	967.24	837.19
23	32.21	26.29	1,000.13	863.81
24	31.11	25.73	1,031.79	889.82
25	30.02	25.20	1,062.35	915.29

Elaboraciòn propia

El modelo numérico en este caso presenta una carga de fisuraciòn semejante a la experimental. Al igual que el modelo anterior la principal diferencia reside en el desplazamiento en que se obtiene la carga pico. En el modelo numérico dicho desplazamiento es de 3 mm mientras que en el

experimento es de 5 mm. En términos de resistencia residual si se traslada pico numérico de resistencia hasta el pico experimental las resistencias residuales (postpico) serían sensiblemente más parecidas pero las numéricas siguen siendo menores. Por tanto, en este modelo también es necesario verificar cuál es el aspecto que está reduciendo la resistencia residual.

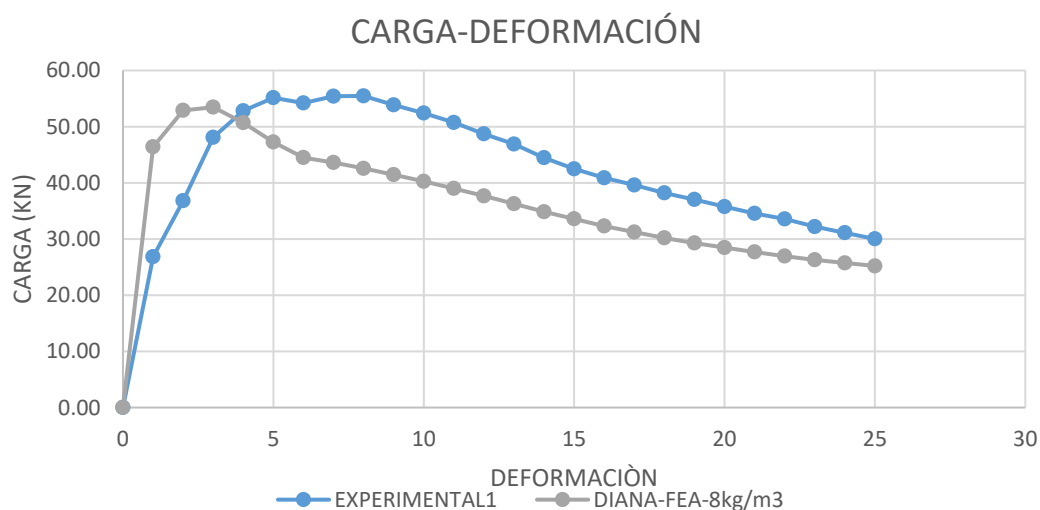


FIGURA 5-21 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-8kg/m3.

Fuente: Elaboración propia

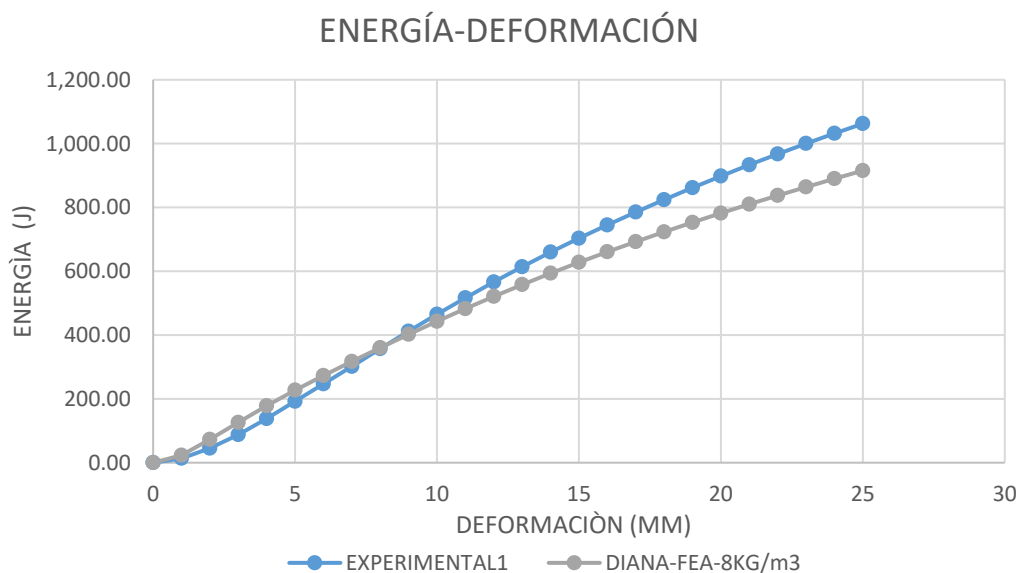


FIGURA 5-22 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-8kg/m3.

Fuente: Elaboración propia

En términos de energía muestra que para valores avanzados de la deformación la energía obtenida en el modelo numérico es inferior a la obtenida en los experimentos. En este caso también se recomienda considerar el rozamiento panel y el marco de acero, para poder reproducir correctamente el ensayo. La tenacidad en este caso se clasifica como Clase C, tanto, para el ensayo experimental como para el numérico numérico.

5.3.3.1 *Propagación y Separación entre fisuras-8Kg/m³*

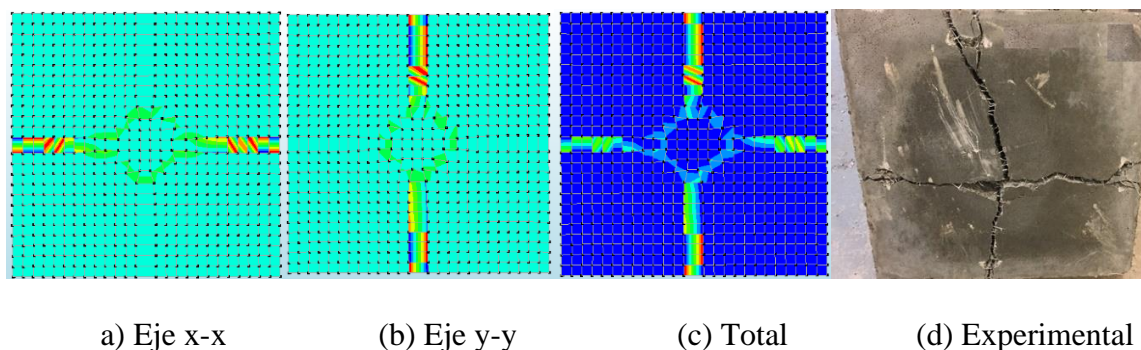


FIGURA 5-23 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m³. Vista en Planta

Fuente: Elaboración propia

En este caso, en el modelo numérico, se puede apreciar que las grietas que se producen siguen siendo perpendiculares como se muestra en la FIGURA 5-23, apartado C, mientras que en el modelo experimental ya se puede ver la diferencia en la forma en que se producen las fisuras, inicialmente se produce la fisuración por flexión, como en el ensayo existe un sistema para incrementar la carga y añadiendo la fuerza de rozamiento que desarrolla la zona apoyada del panel da origen a una carga por punzonamiento, provocando la formación de grietas en torno a la zona cargada. La apertura de grieta en este caso sigue para a) 22.86mm y b) 31.10mm

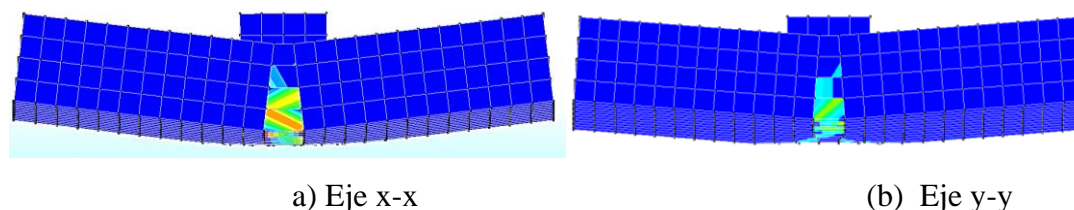


FIGURA 5-24 Separación de fisuras diagonales para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m³. Vista en Frontal

Fuente: Elaboración propia

5.3.3.2 Tensiones y deformaciones 8Kg/m3

En las figuras a continuación se aprecia las tensiones principales máximas para el instante después de la aplicación de la carga, se puede apreciar el riesgo de grieta donde las tensiones se concentran, sobre todo en el lugar donde existe el contacto entre el panel y placa de acero de transmisión de carga.

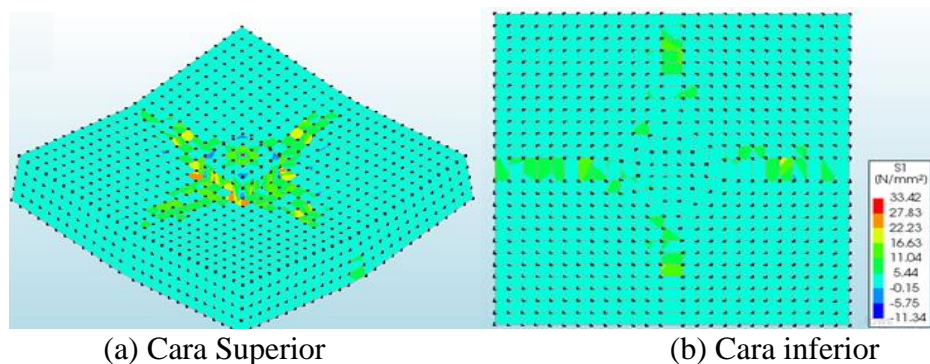


FIGURA 5-25 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA

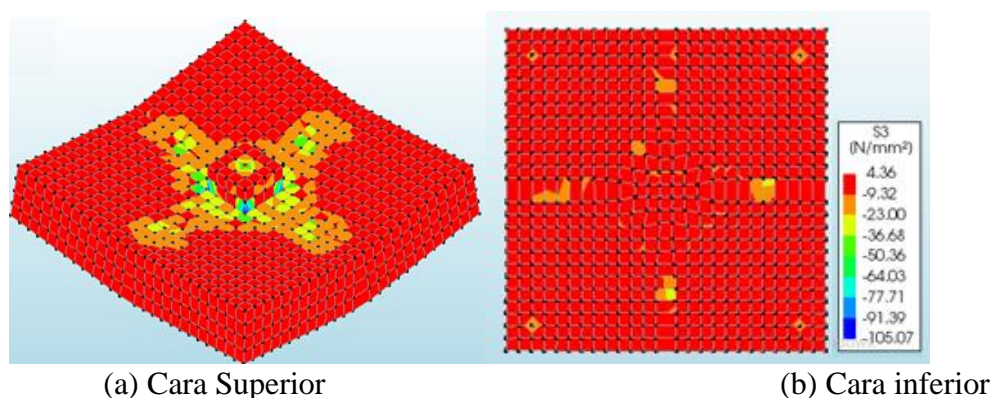


FIGURA 5-26 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA

5.3.4 Comparativa carga-desplazamiento experimental 12kg/m3 DIANA-FEA

El modelo numérico, en este caso presenta una carga de fisuración semejante en términos de carga máxima que soporta con respecto a la experimental. La diferencia del desplazamiento en la carga pico al igual que los modelos anteriores se mantiene. En el modelo numérico dicho desplazamiento es de 5 mm mientras que en el experimento es de 8 mm, con la diferencia de que la carga se mantiene casi sin perder resistencia hasta los 15mm, lo cual no está acorde con el comportamiento experimental. Las resistencias residuales del ensayo numérico, se encuentran en

diferentes picos pero mas cercana a la experimental, una vez mas depende de las condiciones de contorno, en este caso se debe tener especial cuidado en la forma de reproducir numéricamente, ya que la curva tensión-deformación tiene varias diferencias con el comportamiento experimental, por lo tanto, se recomienda verificar el aspecto dentro del modelo numérico.

Tabla 5-6

Comparación numérica-experimental Carga vs Deformación y Energía vs deformación Hormigón-12kg/m³

RESULTADOS DE CARGA(KN) CON 12KG DE FIBRA			RESULTADOS DE ENERGIA(KN) CON 12KG DE FIBRA	
DEFORMACIÓN [MM]	EXPERIMENTAL 1	DIANA-FEA	EXPERIMENTAL 1	DIANA-FEA
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	16.20	62.40	8.10	31.20
2	34.47	63.59	33.44	94.20
3	50.73	64.09	76.04	158.04
4	58.09	64.39	130.45	222.28
5	64.09	65.64	191.54	287.29
6	69.22	64.86	258.19	352.54
7	70.65	65.08	328.12	417.51
8	69.90	65.29	398.39	482.69
9	66.39	64.24	466.54	547.46
10	64.47	63.72	531.96	611.44
11	62.25	63.28	595.32	674.94
12	58.56	62.02	655.73	737.59
13	55.76	60.00	712.89	798.60
14	53.89	54.46	767.71	855.83
15	51.09	53.86	820.20	909.99
16	49.08	52.68	870.28	963.26
17	47.64	52.00	918.64	1015.60
18	45.90	50.12	965.41	1066.66
19	44.28	48.25	1,010.50	1115.84
20	43.19	46.54	1,054.23	1163.24
21	42.20	41.29	1,096.93	1207.15
22	40.50	38.94	1,138.28	1247.26
23	39.10	37.00	1,178.09	1285.23
24	37.35	35.48	1,216.31	1321.47
25	36.32	35.18	1,253.14	1356.80

Fuente: Elaboración propia

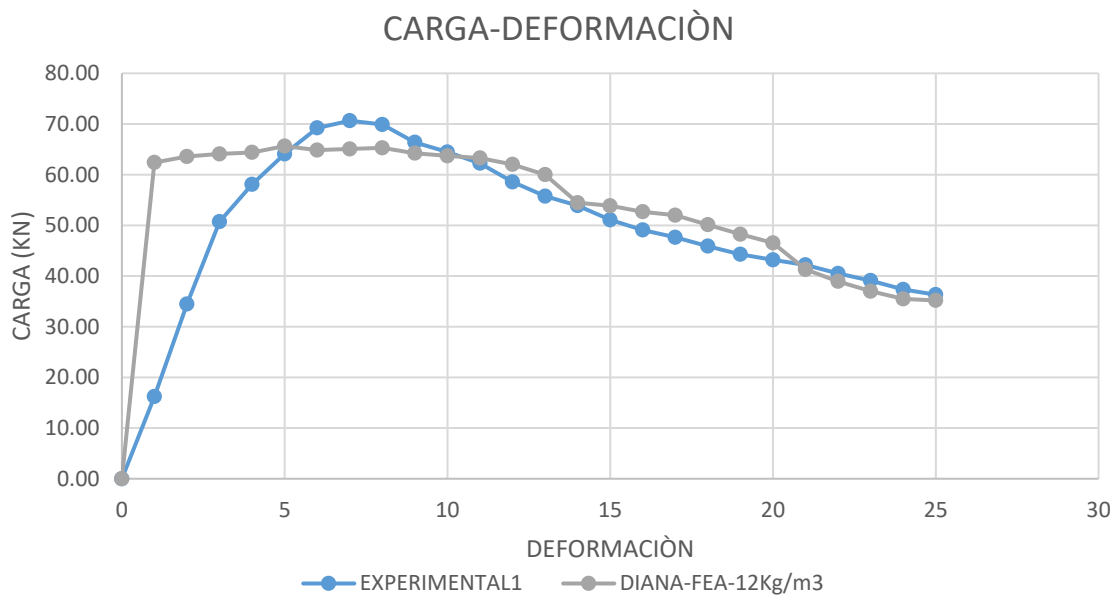


FIGURA 5-27 Carga vs Deformaciòn ensayos experimentales vs DIANA FEA-12kg/m3.

Fuente: Elaboraciòn propia

En términos de energía muestra que para valores avanzados de la deformación la energía obtenida en el modelo numérico es mayor a la obtenida en los experimentos, se recomienda verificar de manera mas profunda el comportamiento con esta cuantía de hormigón con fibras.

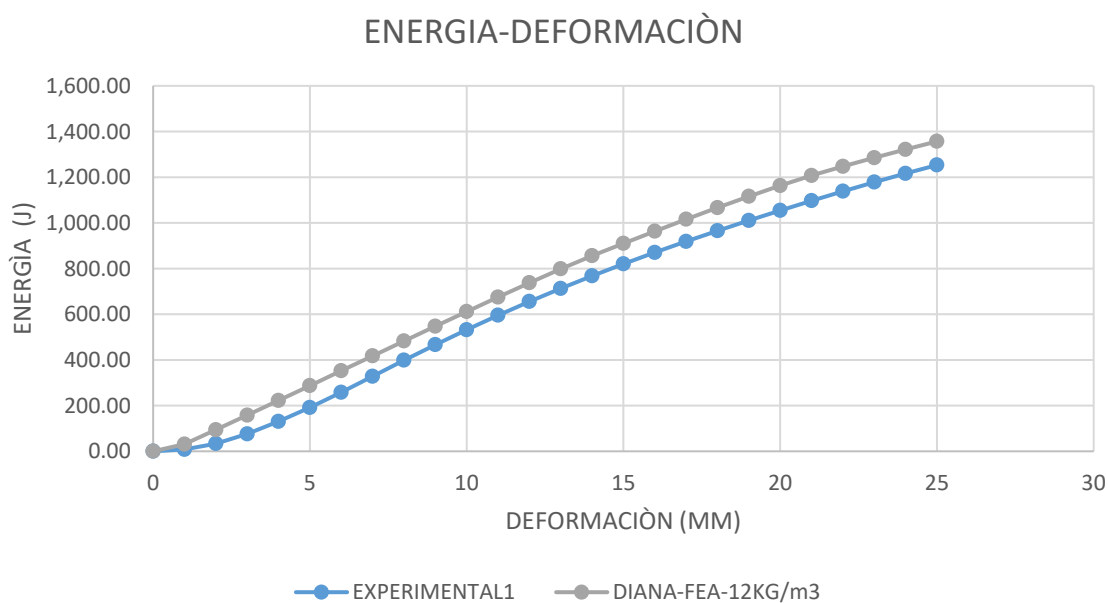


FIGURA 5-28 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-12kg/m3.

Fuente: Elaboración propia

5.3.4.1 Propagación y Separación entre fisuras-12Kg/m³

Las grietas en el modelo numérico para los tres ensayos aparecen de manera perpendicular, en este punto, en el modelo experimental se puede ver la diferencia claramente visible de como es el comportamiento de la fisura en hormigones con altas dosificaciones sobre todo queda mas claro que las grietas que se producen por punzonamiento, se ve experimentalmente un hundimiento en la zona de carga, se recomienda una vez mas tomar muy en cuenta los efectos del rozamiento. La abertura de grieta en este caso sigue para a) 25.86mm y b) 34.33mm que resultan demasiado grandes para este tipo de ensayo.

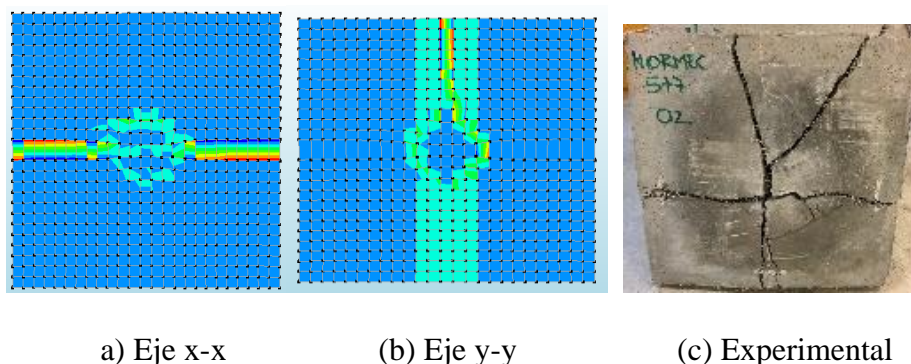


FIGURA 5-29 Mapa de fisuras para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m³. Vista en Planta

Fuente: Elaboración propia.

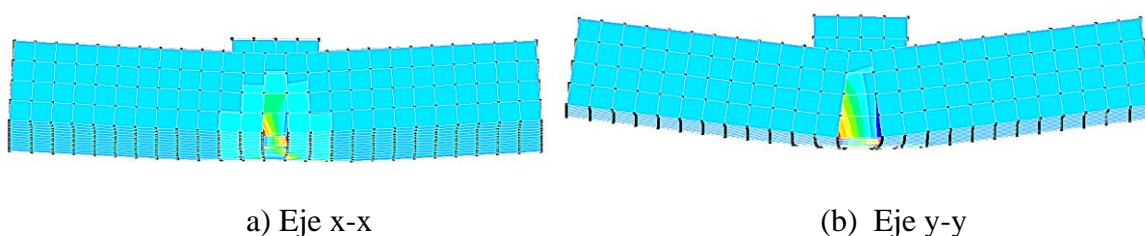


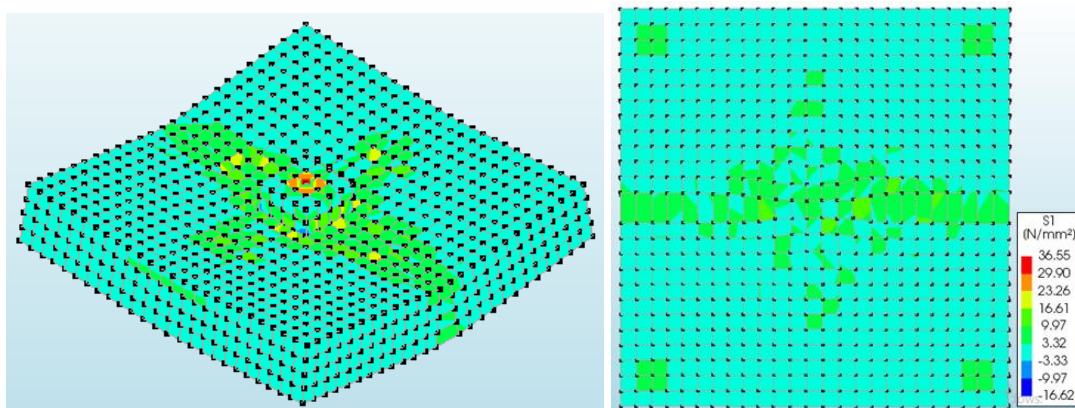
FIGURA 5-30 Separacion de fisuras diagonales para un EFNARC- DIANA FEA-12kg/m³. Vista en Frontal

Fuente: Elaboración propia

5.3.4.2 Tensiones y deformaciones 12Kg/m³

En las figuras a continuación se aprecia las tensiones principales máximas para el instante después de la aplicación de la carga, se puede apreciar el riesgo de grieta donde las tensiones se

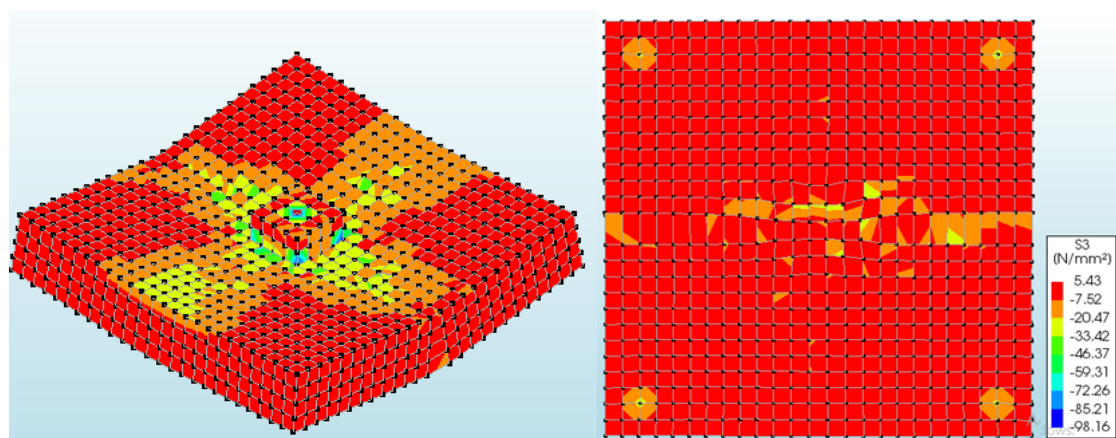
concentran, sobre todo en el lugar donde existe el contacto entre el panel y placa de acero de transmisión de carga. Así mismo se muestra la tensión triaxial que se produce en el elemento modelado.



(a) Cara Superior

(b) Cara inferior

FIGURA 5-31 Máxima Tensión Principal S1. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA



(a) Cara Superior

(b) Cara inferior

FIGURA 5-32 Tensión Principal S3. Fuente: Elaboración Propia-DIANA FEA

Finalmente presentamos un cuadro de las relaciones Carga-Deformación y Energía-Deformación, donde, se ve claramente las diferencias, los puntos a trabajar son sobretodo en la zona el pico de carga donde se produce la fisura y las resistencias residuales que se producen en los paneles ensayados numéricamente, puesto que dan resultados menores a los experimentales.

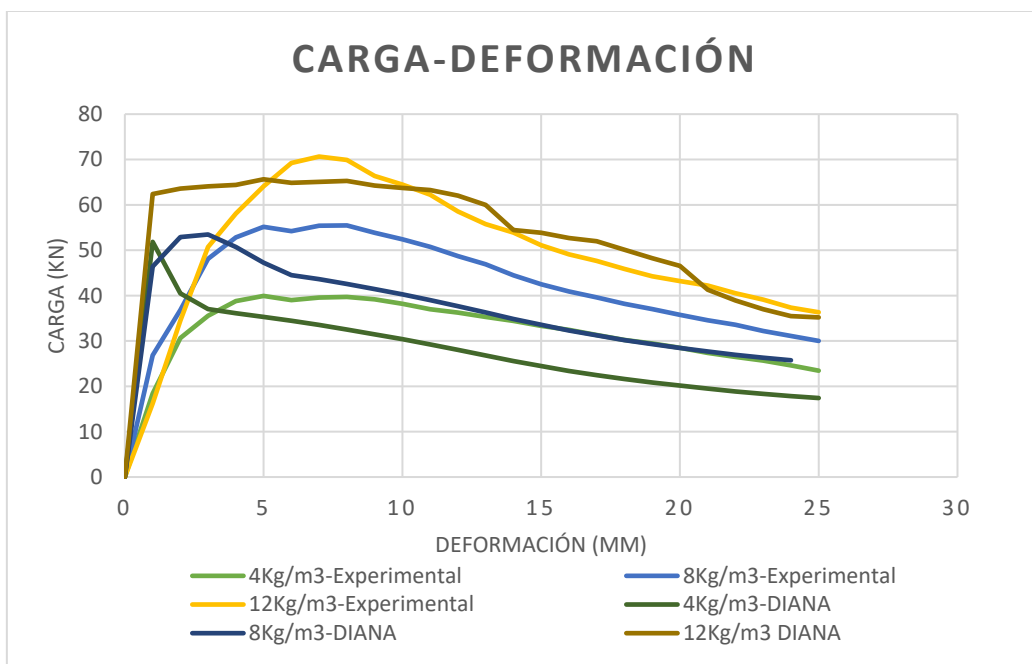


FIGURA 5-33 Carga vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4-8-12kg/m³.

Fuente: Elaboración propia

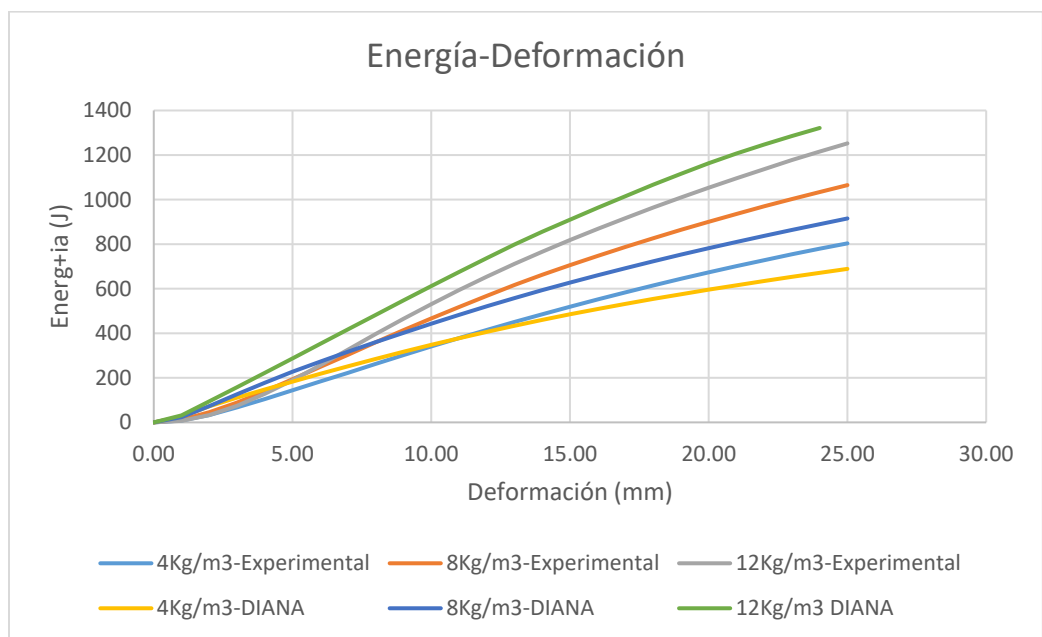


FIGURA 5-34 Energía vs Deformación ensayos experimentales vs DIANA FEA-4-8-12kg/m³.

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 6.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 CONCLUSIONES

Una vez descrito el comportamiento del modelo numérico para un panel EFNARC con la mínima cuantía de fibra, se procedió a establecer las conclusiones de dicho estudio.

En este trabajo, los ensayos de una campaña experimental de un panel EFNARC ensayados hasta rotura han sido simulados numéricamente mediante un modelo no lineal de elementos finitos 3D con el objetivo de profundizar en el conocimiento e interpretación de este ensayo y estudiar las variables como, la deflexión central, curva carga-deformación y el comportamiento a fisuración.

Conclusiones relativas al estado del conocimiento:

- ✓ El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un hormigón que, gracias a sus propiedades, está en pleno auge en la actualidad. Las fibras, en la composición del hormigón, son capaces de aportar a éste propiedades mejoradas: aumento considerable de la resistencia a tracción, aumento de la ductilidad, aumento en la energía de fractura y mayor control de fisuración.
- ✓ Existen varias propuestas de modelos constitutivos para definir el comportamiento del HRF a tracción. Los más comunes son los que representan el comportamiento del HRF mediante leyes tensión-deformación, con aproximación indirecta, y con ecuaciones

discretas. Entre ellas, las más reconocidas son las correspondientes a RILEM, EHE-08 y fib Model Code 2010.

Conclusiones relativas a la campaña experimental:

- ✓ Se define el comportamiento de un hormigón con diferentes contenidos de fibra: 4kg/m^3 , 8 kg/m^3 , 12kg/m^3 a base de los ensayos de caracterización del material. Se comprueba que los paneles dosificados con 4g/m^3 paneles fallan a flexión y los de mayor cuantía 8g/m^3 y 12g/m^3 a parte de la flexión fallan por punzonamiento, se determina los parámetros, geometrías de la sección transversal, cuantías de fibras, desplazamiento central y posición de la carga.

Conclusiones relativas a la modelización numérica:

- ✓ El modelo numérico propuesto en 3D, basado en un modelo de fisura distribuida, es una herramienta de análisis no lineal con el cual se pueden obtener los valores obtenidos en campañas experimentales en laboratorios en términos de desplazamientos, fisuración, disipación de energía entre otros, siempre y cuando se ajusten de manera correcta los diferentes parámetros que caracterizan el comportamiento a rotura.
- ✓ En la simulación del comportamiento no lineal del concreto reforzado con fibras Barchip 54 mediante el modelo de fisura distribuida se puede observar la importancia de la caracterización del material ya que influye directamente en la respuesta estructural del Panel EFNARC bajo un régimen de cargas que producen flexión. Una de las limitaciones de este modelo numérico consiste en no incluir de manera más detallada el proceso de rozamiento entre el modelo de hormigón y la plataforma de apoyo.
- ✓ Para caracterizar el comportamiento no lineal del panel EFNARC modelado se requiere conocer y definir los modelos constitutivos de los materiales usados, y superar los

problemas producidos por el movimiento del panel, se puede observar el lugar de concentración de esfuerzos que se producen en el centro del elemento y en la proximidad de los apoyos, entre otros. Los problemas mencionados pueden superarse mediante la representación adecuada de las condiciones de contorno, así como un exhaustivo estudio de las herramientas numéricas disponibles

- ✓ Las respuestas numéricas del panel analizado comparada con los resultados obtenidos de la experimentación son bastante aproximadas. Sin embargo, el no incluir de manera detalla efectos de rozamiento y debido a la ley constitutiva utilizada, genera algunas diferencias en los resultados numéricos. En consecuencia, representar este tipo de fenómenos requeriría enriquecer la cinemática con el uso de modelos constitutivos que representen el ablandamiento del material y con elementos finitos que detallen el mecanismo de fallo del concreto.

6.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una de las futuras líneas de investigación se propone mejorar el modelo numérico.

- ✓ Inclusión en el modelo numérico un modelo que tenga en cuenta de manera más profunda la interface hormigón y acero para analizar de manera más realista el comportamiento del panel EFNARC Y las variaciones que produce el rozamiento en los apoyos.
- ✓ Continuar el estudio iniciado en este trabajo aplicado más parámetros que influyen en la rotura del hormigón, para determinar de mejor manera el proceso de fisuración acorde a la cantidad de cuantía.
- ✓ Diana dentro de su paquete de datos contiene varias maneras de representar el comportamiento tensional de hormigón con fibras, cada uno de ellos demanda criterios importantes como la energía de compresión, resistencia a compresión, resistencia a tracción entre otros. Se recomienda reproducir el modelo de panel Efnarc utilizando los diferentes criterios para el comportamiento a tracción, permitiendo de esta manera en un futuro poder reproducir el ensayo de manera más similar a los ensayos experimentales.
- ✓ Estudiar la sensibilidad del ensayo a parámetros como: contacto irregular en los apoyos, variación del coeficiente de rozamiento ante el hormigón y el apoyo
- ✓ Continuar el estudio iniciado en este trabajo a paneles que tengan una dosificación diferente, en este caso específico, 8Kg/m^3 y 12g/m^3 , con el fin de poder realizar una comparativa del comportamiento tensional y presencia de fisura de los modelos numéricos con respecto a los modelos experimentales aquí descritos.

CAPITULO 7.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] EHE-08, “Instrucción del hormigón estructural EHE-08,” p. 704, 2011.
- [2] C. Molins and O. Arnau, “Modelización estructural del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA).” Barcelona, p. 39, 2007.
- [3] C. B. PUIG, “COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN CON FIBRAS METÁLICAS.,” UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA, 2011.
- [4] E. Sola, “Sustitución del hormigón armado por hrfa en forjados convencionales de edificación.,” UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, 2012.
- [5] M. Martinez, “Análisis en rotura de placas de hormigon reforzado con fibras de acero.,” UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALONYA.
- [6] A. V. Monsó, “Análisis del comportamiento del hormigón reforzado con fibras para el ensayo Barcelona y de flexotracción.,” UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA, 2011.
- [7] N. A. HURTUBIA, “Universidad tecnica federico santa maria departamento de obras civiles valparaiso - chile,” UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES VALPARAISO-CHILE, 2015.
- [8] H. Ramos, “Aplicación de Fibras Estructurales a los Pilotes tipo CPI 8,” UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, 2012.
- [9] ENDORSED, “Programa de certificación para técnicos gunitadores de EFNARC Notas del

curso.”

- [10] U. Manuel, P. Luis, R. Paul, M. Fernanda, and A. Juan Carlos, “Diseño, fabricación y puesta en Obra Del Hormigón Proyectado En Obras Subterráneas.” 2015.
- [11] P. Mármol, “Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas Hormigones con Fibras de Acero,” 2010.
- [12] V. Espinoza, “Memoria de titulación presentada por : VALENTINA PAZ ESPINOZA TORRES CONSTRUCTOR CIVIL Profesor Guía :,” UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA, 2017.
- [13] EFNARC, *Guidelines for specifiers and contractors*, vol. 44, no. 0. 1999.
- [14] A. V. Lara, “CARACTERIZACION DE PROPIEDADES DE HORMIGONES CON FIBRAS SINTETICAS MODIFICADAS CON POLIMEROS,” UNIVERSIDAD FEDERICO SANTA MARIA DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES VALPARAISO - CHILE, 2016.
- [15] T. Garcia, L. Agulló, A. Aguado, and G. Canals, “Evaluación de la tenacidad en el hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de alto módulo,” *researchgate.net*, 2004.
- [16] S. Carmona, C. Molins, and S. Garcia, “USE OF BARCELONA TEST FOR CONTROLLING ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF FRS IN TUNNELLING.”
- [17] B. Á. Ana, P. Pablo, and A. Albert, de la Fuente Antequera Antonio, “Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras,” no. January, 2010.
- [18] Ø. Bjøntegaard, “Energy absorption capacity for fibre reinforced sprayed concrete. Effect of friction in round and square panel tests with continuous support (Series 4),” *Nor. Public Roads Adm.*, vol. Technology, no. 2534, pp. 1–53, 2009.
- [19] F. B. Rodríguez, “Comportamiento no lineal de vigas isostáticas de hormigón parcialmente

pretensado,” 2016.

- [20] DIANA-FEA, *Diana User's Manual*, Jonna Mani. DIANA FEA BV.
- [21] F. J. Vecchio and M. P. Collins, “The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear,” 1986, vol. 83, no. 2, pp. 219–231.
- [22] J. G. ROTS, “Computational Modeling of Concrete Fracture,” Delft University of Technology, 1988.
- [23] S. Govindjee, J. K. Gregory, and J. C. Sismo, “nme @ onlinelibrary.wiley.com,” *Anisotropic Model. Numer. Simul. brittle damage Concr.*, 1995.
- [24] O. Arnau, “Structural Response of Precast Concrete Segmental Tunnel Linings - PhD thesis at Univeristat Politecnica de Catalunya, Spain,” 2012.
- [25] fib CEB-FIP, *fib Model Code for Concrete Structures*. 2010.
- [26] S. A. Carmona Malatesta and C. Molins, “Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona,” pp. 341–350, 2018.
- [27] Rijkswaterstaat Ministry of Infrastructure and the Environment, “Guidelines for Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structures,” p. 65, 2012.
- [28] M. Drygiannakis, “Investigation on the strength of spandrels in masonry façades,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2017.

CAPITULO 8.

ANEJOS

ANEJO 1

8.1 INTRODUCCIÓN

Como se mencionó previamente en la tesina para calibrar los datos del panel EFNARC en DIANA-FEA se realizó una serie de ensayos en vigas describiendo el procedimiento que se muestra a continuación. Este ejemplo de viga describe cómo modelar elementos de hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC) con DIANA. El ejemplo implica la simulación de una prueba de flexión de tres puntos de un prisma concreto basado en la configuración típica para la caracterización de materiales SFRC de acuerdo con la norma europea EN 14651 (2005). La prueba de flexión de tres puntos de una viga con entalla (FIGURA A- 1) se utiliza para la determinación de los parámetros del material. Para un material SFRC, el comportamiento a la tracción se describe en términos de Resistencia a la tracción a la flexión residual determinada a partir de la curva de desplazamiento de apertura de la boca de carga frente a la grieta o la curva de carga frente a la curva de deflexión proporcionada por la prueba de flexión.

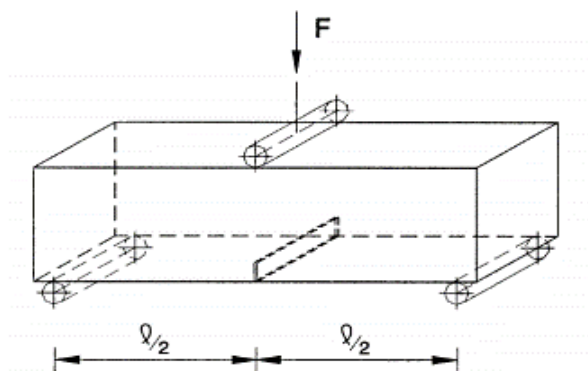


FIGURA A- 1 Detalle de viga para la prueba de flexión de SFRC

8.2 ENSAYO EXPERIMENTAL

Para caracterizar el comportamiento a tensión, que es uno de los aspectos más importantes de los hormigones reforzados con fibra utilizamos el ensayo requerido en la EN 16551, que se puede observar en la figura. La viga tiene un alcance de 500 mm, con una extensión de 25 mm en ambos lados de los soportes, con una longitud total de 550 mm. ella viga tiene una sección transversal de 150 mm x 150 mm. Se produce una entalla en el área central inferior de la muestra para una profundidad de 5 mm.

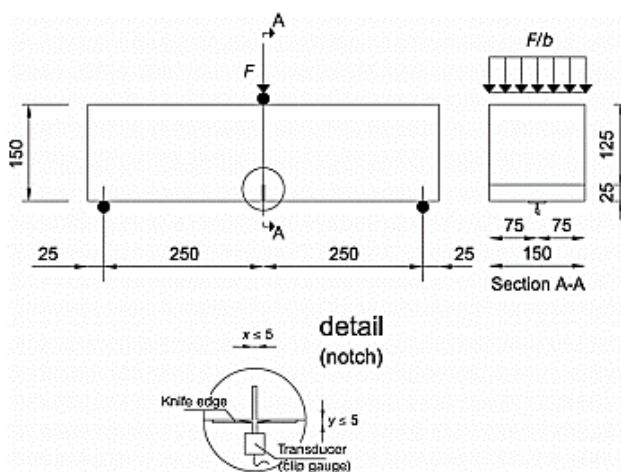


FIGURA A- 2 Detalle de la entalla medida del CMOD por EN 14651

8.2.1 Caracterización de material

Los parámetros mecánicos de entrada del modelo de material SFRC en DIANA se pueden determinar mediante los resultados de las pruebas de laboratorio. La prueba de flexión de tres puntos proporciona la curva de deflexión de carga, que se puede utilizar para obtener la curva de anchura de tensión-grieta correspondiente. A partir de la prueba, se puede producir el diagrama de la fuerza aplicada (F) frente a la deformación, en la que la deformación se expresa en términos de apertura de la boca de fisura (CMOD), como se muestra a continuación:

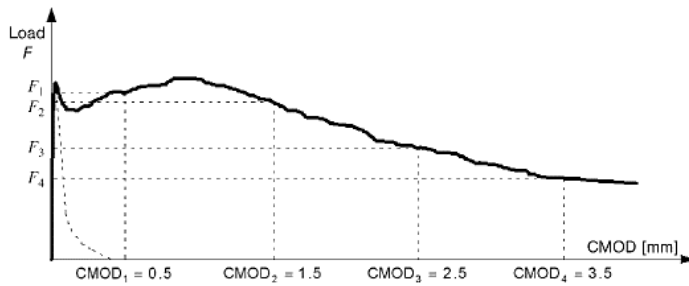


FIGURA A- 3 Curva Típica F-CMOD

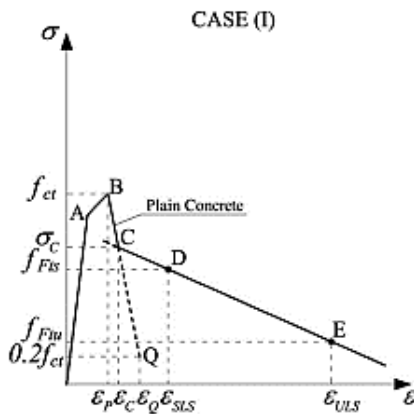


FIGURA A- 4 Curva twnsión-deformación unitaria consyiyutiiva para material FRC

8.2.2 Modelo de elementos finitos

Para la sesión de modelado iniciamos un nuevo proyecto con un en un modelo de elemento finito dibimensional (2D) y posteriormenrte tridimensional (3D), establecemos las dimensiones del ensayo y utilizamos elementos finitos cuadrilaterales cuadráticos, las unidades de trabajo son milímetros para las dimensiones geométricas, la masa en toneladas, la fuerza en Newton, y el ángulo en grados. El proceso de modelado sigue la siguiente secuencia:

- ✓ Los bloques de soporte de la viga y el bloque de transferencia de carga se modelan como superficies con propiedades de material lineal-elástico. Las interfaces se colocan entre estos bloques y la viga de hormigón, luego se proyecta el modelo para tener un elemento en tres dimensiones.
- ✓ La entalla se modela de hormigón se modela como bidimensional y luego se proyecta.

- ✓ Se asume el orden de malla cuadrática
- ✓ Para el material SFRC, el modelo de hormigón reforzado de fibra se utiliza para la entrada de la curva de tracción.
- ✓ Se realiza un análisis estático no lineal para describir la curva de carga y deflexión completa
- ✓ El análisis se lleva a cabo en función del control de desplazamiento
- ✓ Los desplazamientos y el ancho de las grietas se muestran después del análisis

8.2.2.1 Definición geométrica

Para modelar la geometría de la viga en DianaIE, comenzamos creando las superficies de los elementos de la prueba, mediante coordenadas especificamos los puntos que definen el trazado, se crea el bloque de aplicación de carga, los soportes que simulan los apoyos, la geometría de la viga, especificada el punto de fisura (crack) y la entalla.

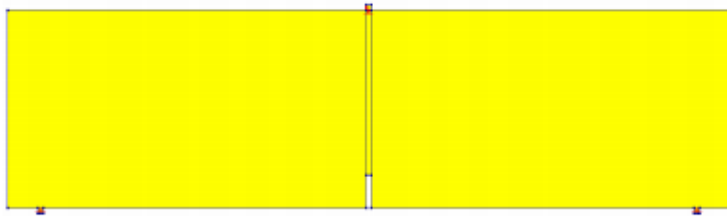


FIGURA A- 5 Geometría de la viga en Diana-Frontal

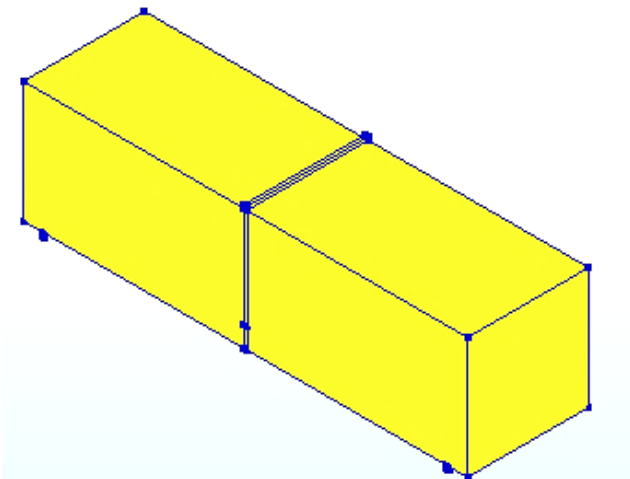


FIGURA A- 6 Geometría de la viga en Diana-en 3D

8.2.2.2 Propiedades del material

En este ejemplo asumiremos una clase SFRC 3c, con una clase de referencia específica C30 para hormigón plano. Los valores de los parámetros mecánicos que definen la ley constitutiva de tracción para el material SFRC de acuerdo con el código modelo FIB 2010 para el material reforzado con fibra y las propiedades del acero se resumen en la Tabla 8-1, Tabla 8-2 y Tabla 8-3

Tabla 8-1

Propiedades lineales del material acero.

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		ACERO	
Young's modulus	E	200000	N/mm ²
Poisson's ratio	v	0	
Mass density	p	0.00E+00	T/mm ³

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-2

Parámetros según fib Mode Code 2010- fck=30Mpa

Parámetros según código modelo 2010				
Resistencia característica compresión	fck	30.0	Mpa	
Resistencia a la compresión	fcm	38.0	Mpa	
Resistencia de cálculo a compresión	fcd	20.0	Mpa	
Resistencia media a tracción	fctm	2.9	Mpa	
Resistencia característica a tracción	fctk,mín	2.0	Mpa	
Resistencia característica a tracción	fctk,máx	3.8	Mpa	
Módulo de deformación instantáneo	Ec	33550.6	Mpa	
Módulo de deformación	Ecm	29738.0	Mpa	
Energía de fractura en tensión	GF	140.5	N/m	
Energía de fractura en compresión	GC	35.1	N/mm	
Resistencia de diseño a tracción	fct,d	1.4	Mpa	
Coef. variación	Δf	8.0	Mpa	
Módulo de elasticidad inicial	Eco	21500.0	Mpa	
Densidad hormigón	p	2.4e-9	T/mm ³	
Poisson ratio	v	0.2		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8-3

Propiedades del comportamiento tensional del hormigón reforzado con fibras-C30

CARACTERISTICAS DEL MATERIAL		HORMIGÓN	
Propiedades lineales del material			
Young's modulus	E	38629.09	N/mm2
Poisson's ratio	v	0.15	
Mass density	p	2.40E-09	T/mm3
Total strain based crack model			
Rotating			
Comportamiento a tracción			
Tensile curve	Fib fiber reinforced concrete		
CMOD oe strain curve	CMOD		
Uniaxial tensile strength	fl	1.83	N/mm2
Uniaxial residual strength	fRi	2.03	N/mm2
Crack mount opening at fRi		0.00225	mm
Uniaxial residual strength	fRj	1.49	N/mm2
Crack mount opening at fRj		0.025	mm
Uniaxial residual strength	fRk	0.75	N/mm2
Crack mount opening at fRk		2.5	mm
Ultimate crack mount opening		8	mm
Stress factor fiber reinforced concrete model		1	
Poisson´s ratio reduction	Damage model		
Comportamiento a compresión			
Compression curve			Parabólico
Compressive strength	fck	42	N/mm2
Compressive fracture energy	Gc	35.1256	N/mm
Crack bandwith specification			Govindjee
Residual compressive strength		0	N/mm2
Reduction model		Vecchio and Collins 1993	
Lower bound reduction curve			0.4
Confinement model			No increase

Fuente: Elaboración propia

8.2.3 Condiciones de contorno

Se colocan los soportes, primero en el punto medio de borde superior del soporte izquierdo que se apoya en la dirección Y, luego se prueba colocando el soporte en ambos apoyos y finalmente para el modelo final se coloca el soporte en el centro con el fin de obtener un desplazamiento uniforme en la distribución del desplazamiento. En los apoyos inferiores se coloca soportes de

modo que en el apoyo derecho se restringe el movimiento en las direcciones X y Y y el izquierdo en Y.

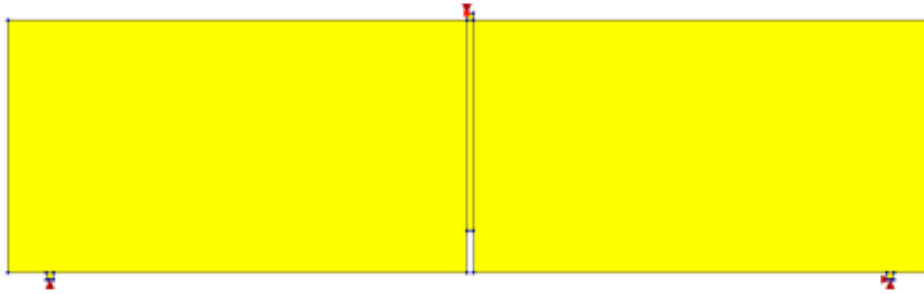


FIGURA A- 7 Condiciones de contorno-soportes

Dado que la carga se aplica a través de una deformación prescrita, adjuntamos un soporte en la dirección y en el vértice del bloque donde es aplicada. A continuación colocamos la carga que incluye la deformación prescrita y el desplazamiento actúa en dirección y es este caso se coloca una deformación prescrita de -1mm.

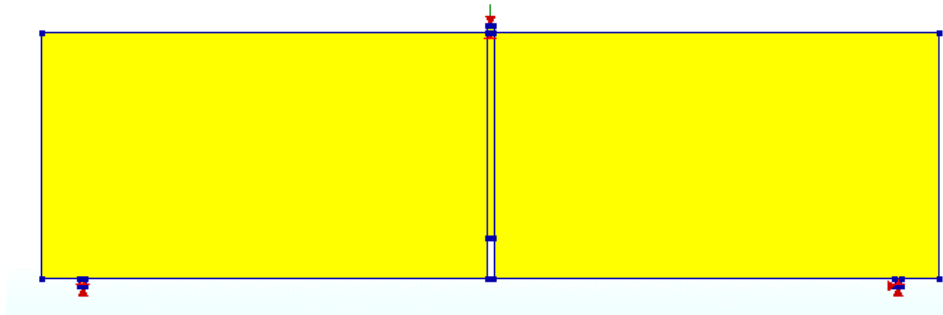


FIGURA A- 8 Condiciones de contorno-Aplicación de carga

A continuación se asigna las propiedades de malla al modelo, se define el tamaño de elemento de 15mm para los elementos de hormigón sin incluir la zona de crack, se asigna un tamaño de 4mm para la entalla y el bloque de transmisión de carga, por último, se asigna un tamaño de elemento de 2mm a los bloques de soporte de los apoyos como se muestra en la figura a continuación:

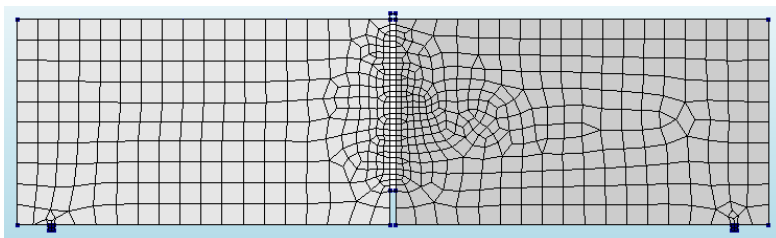


FIGURA A- 9 Condiciones de contorno-Mallado-Frontal

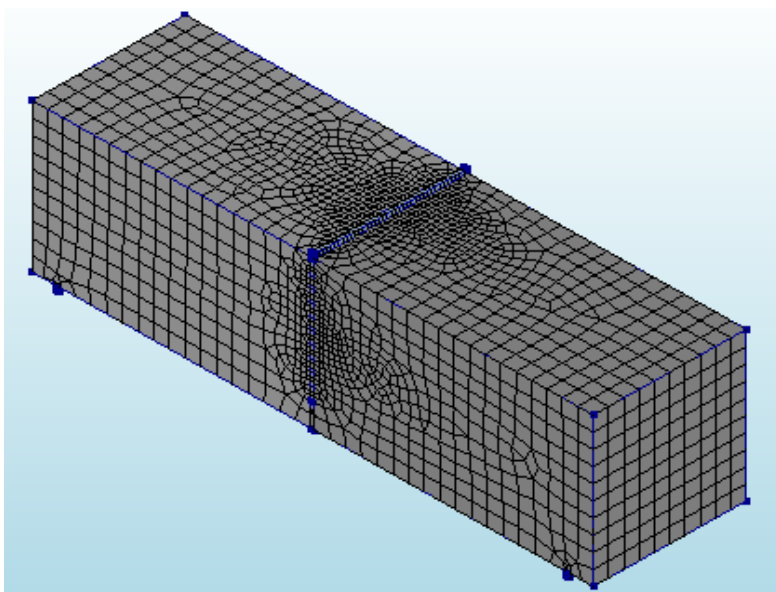


FIGURA A- 10 Condiciones de contorno-Mallado viga 3D

Los criterios para deterinar el máximo valor del elemento se determinam mediante la siguiente tabla:

Tabla 8-4

Máximo Tamaño de elemento

VIGAS	MÁXIMO TAMAÑO DE ELEMENTO			
2D	Mín	1/50	h/6	
3D	Mín	1/50	h/6	b/6

Fuente: Elaboración propia

8.2.4 Analisis no lineal

Se comienza determinando los comandos de análisis, se agrega un comando estructural de análisis no lineal, aquí se determina el conjunto de carga con el que trabaja y que se definio en función de la deformación prescrita, también definimos los tamaños de los pasos que para los elementos modelados en 2D Y 3D de vigas, se define un total de 625 pasos con el siguiente tamaño 0.01(5) 0.001(150) 0.005(200) 0.01(300) en 2D y 0.1(5) 0.01(150) 0.025(200) 0.01(300) en 3D.

Se asumió un máximo de 20 iteraciones y se pide satisfacer las normas de convergencia de energía y fuerza, elegimos también continuar el análisis en el caso de no lograrse la convergencia. Por último se determina las propiedades de las que se quieren obtener el resultado, tal como, el desplazamiento total, los tensiones y deformaciones principales, locales y globales, las fuerzas y reacciones en el punto de aplicación de carga como el estado total de fisuración.

8.2.5 Resultados

Terminado el análisis no lineal a continuación se presenta la grafica de contorno de los desplazamientos en dirección vertical.

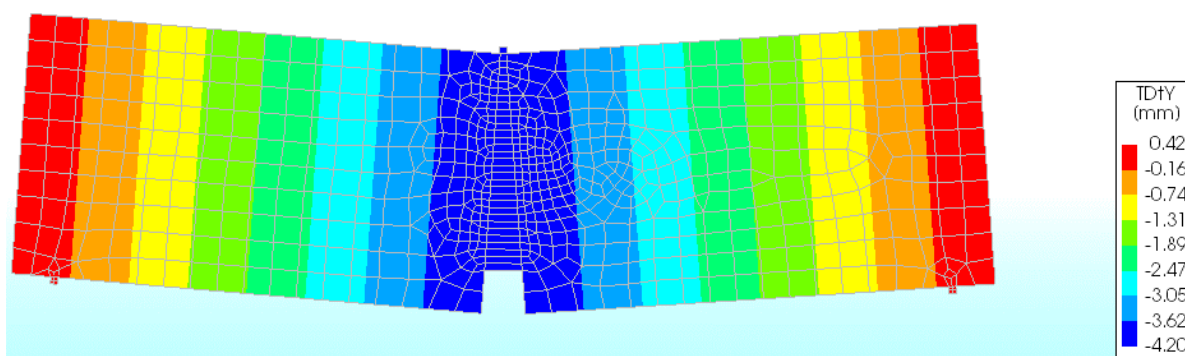


FIGURA A- 11 Desplazamientos verticales

El valor de fuerza de reccion vertical para cada paso de carga carga se muestra en la figura a continuación.

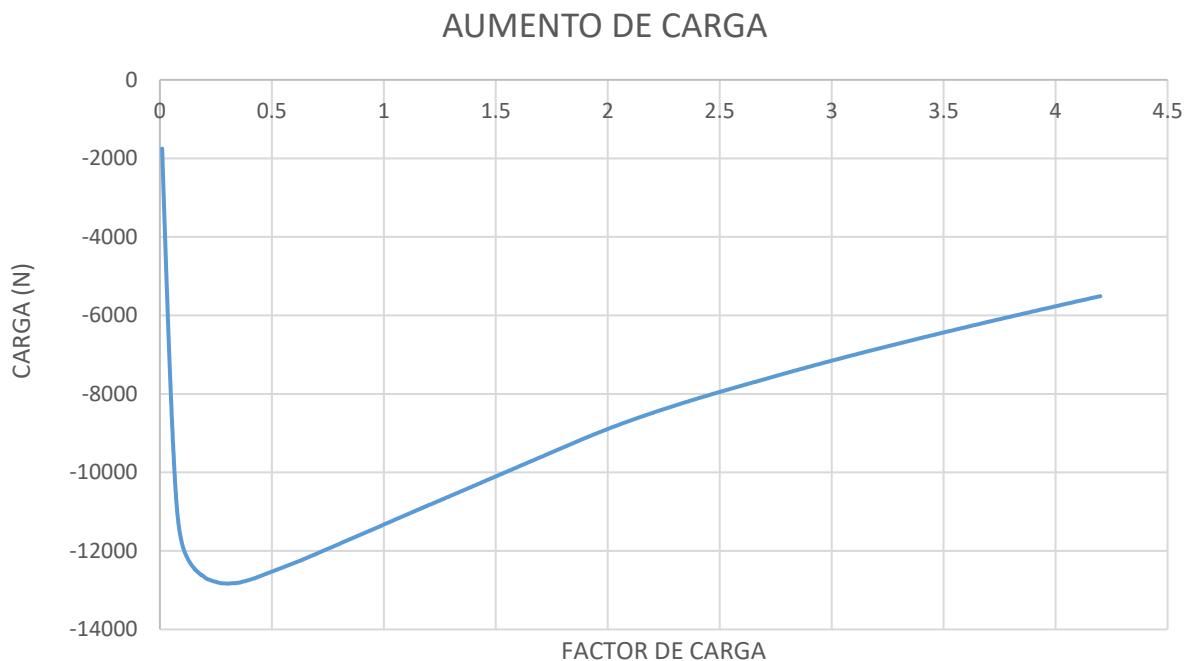


FIGURA A- 12 Diagrama de Reaccion fuerza vs Factor de Carga

En la siguiente figura se puede observar el contorno de los anchos de grieta para el último paso de carga. Aquí se comprueba la relación deformación-ancho de fisura que son semejantes de acuerdo las relaciones establecidas en los códigos; el ancho determinado es de 4.11mm.

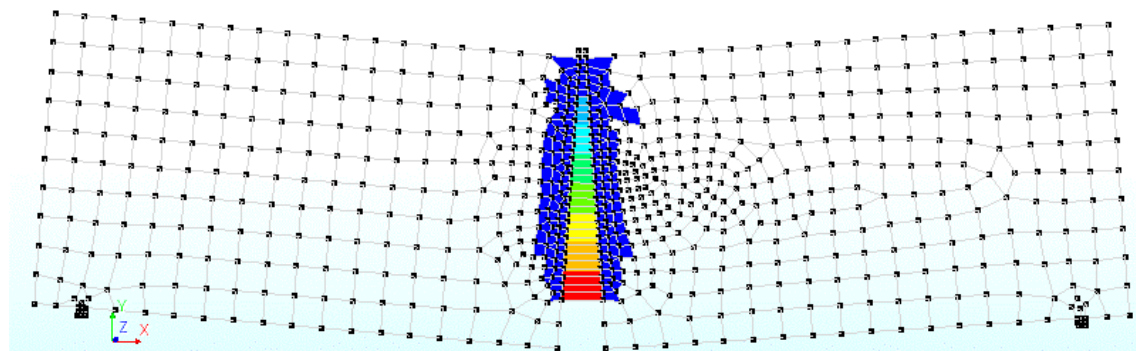


FIGURA A- 13 Ancho de grieta.

Las figuras a continuación muestran la variación de ancho de grieta en función de la deformación y la tensión local para cada paso de carga en el nodo elegido.

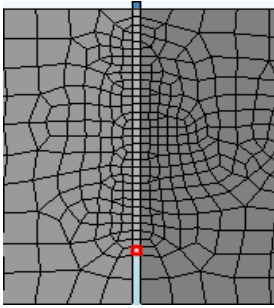


FIGURA A- 14 Nodo y elemento seleccionado

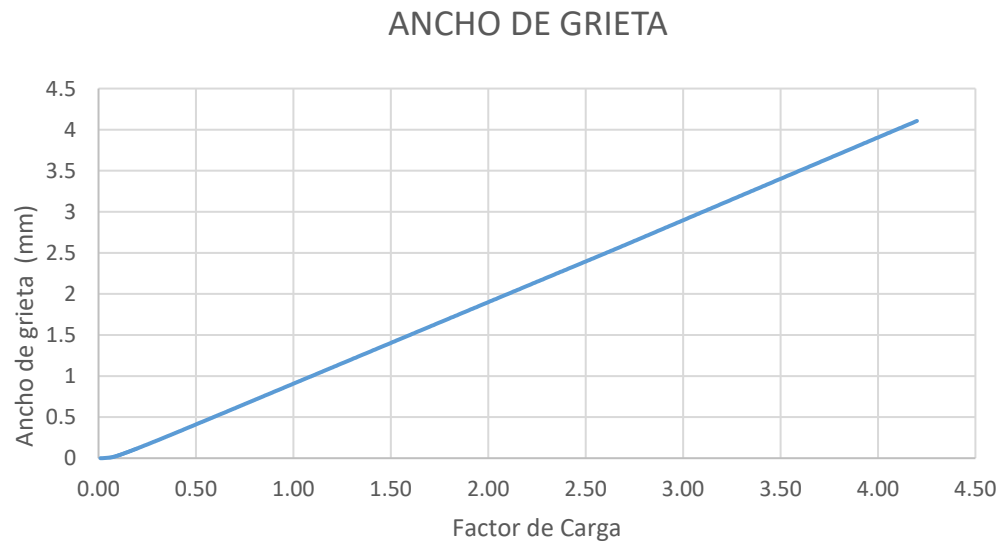


FIGURA A- 15 Valores de Ancho de grieta.

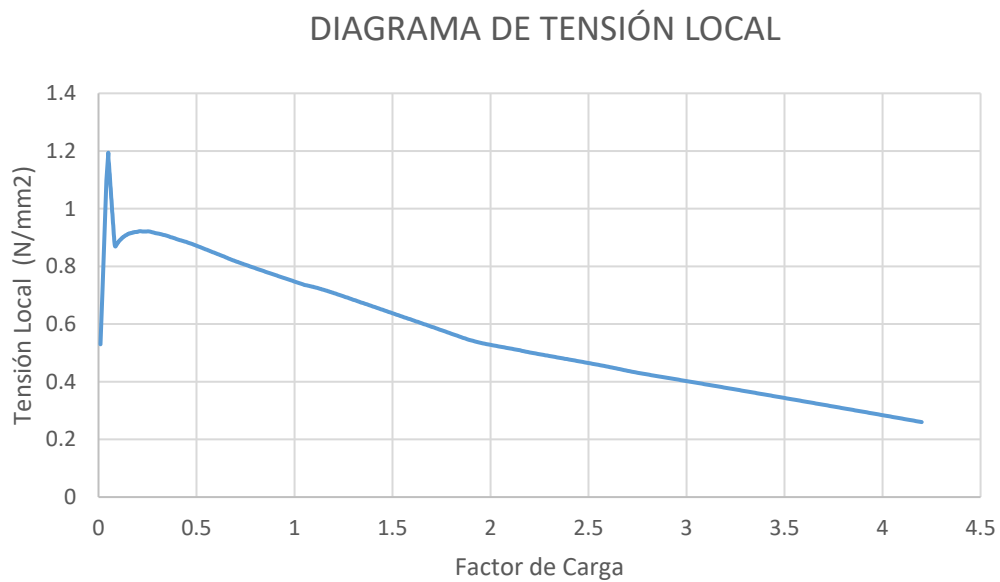


FIGURA A- 16 Valores de la tensión local Sxx para cada pso de carga

Finalmente el siguiente grafico presenta curva Carga-desplazamiento para el tipo de hormigón C30.

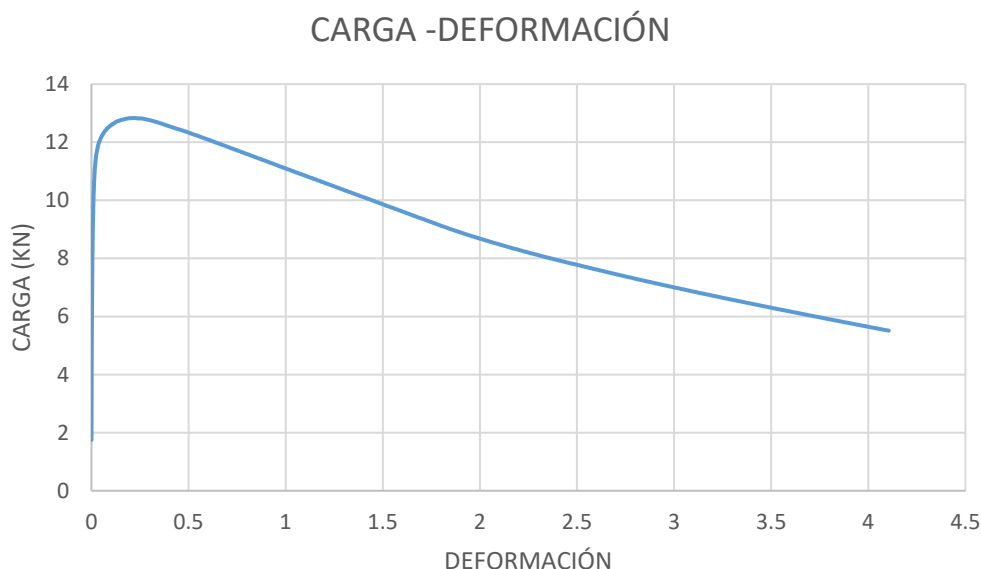


FIGURA A- 17 Curva de carga- deformación-hormigon C30.

8.2.6 Conclusiones

- ✓ En conclusión el proceso antes descrito permite tener un primer acercamiento a la caracterización y comportamiento de un hormigón dosificado con fibras.
- ✓ En el proyecto se describe la caracterización del material con 4kg/m^3 , 8kg/m^3 y 12kg/m^3 siguiendo el mismo proceso que el Anejo 1.
- ✓ Para la caracterización del comportamiento 4kg/m^3 , 8kg/m^3 y 12kg/m^3 , cambia el valor de la deformación prescrita llegando hasta una deformación total de 25mm ensayado en vigas.
- ✓ Con los ensayos experimentales se determinó el comportamiento en función de la tensión residual para cada uno de los modelos dosificados con 4kg/m^3 , 8kg/m^3 y 12kg/m^3 .
- ✓ El proceso descrito en el Anejo 1 sirvió para modelar las vigas en 2D y 3D, presentando resultados en modelos tridimensional (3D), puesto que sirve de base para iniciar con el modelo en panel que resulta más complejo.

ANEJO 2

8.3 Análisis inverso/Análisis directo

Las pruebas de flexión determinan la relación de desviación de carga, las relaciones de ancho de grietas de tensión mediante análisis inverso, realizando cálculos de equilibrio para numerosas aberturas de grietas. El empleo del análisis inverso y el análisis directo se utilizan para la caracterización del comportamiento a tracción del HRF, definiendo el procedimiento para obtener el modelo constitutivo en la siguiente figura.

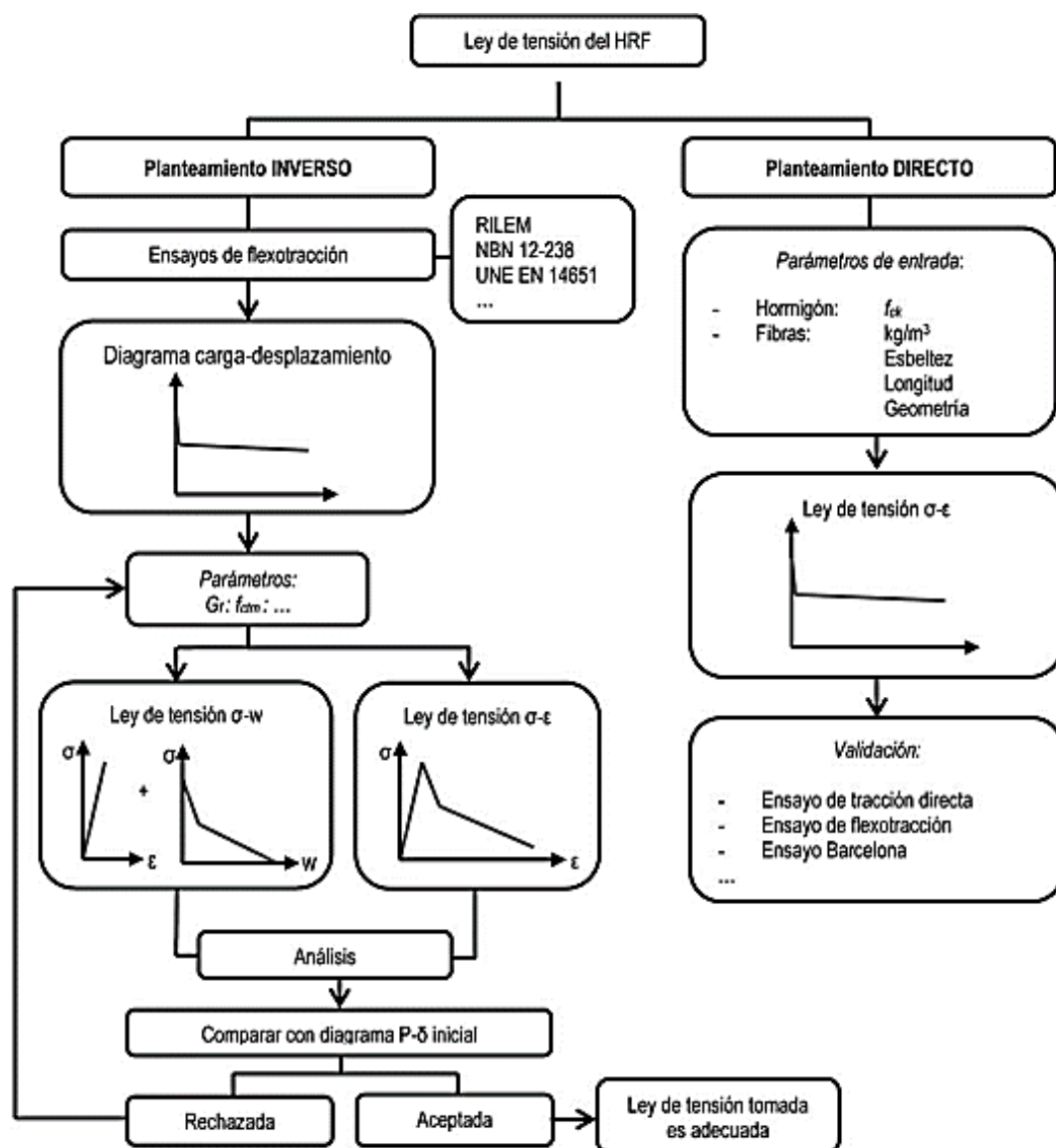


FIGURA A- 18 Procedimiwntos para la obtención de un modelo constitutivo HRF.

8.4 Cálculo del diagrama de interacción según la RILEM

Los valores nominales de las propiedades del material se pueden determinar realizando una prueba de flexión de tres puntos en una viga dentada de acuerdo con la norma EN 14651. Este ensayo se denomina CMOD (Crack Mouth Opening Displacement).

8.4.1 Relación deformación δ -w

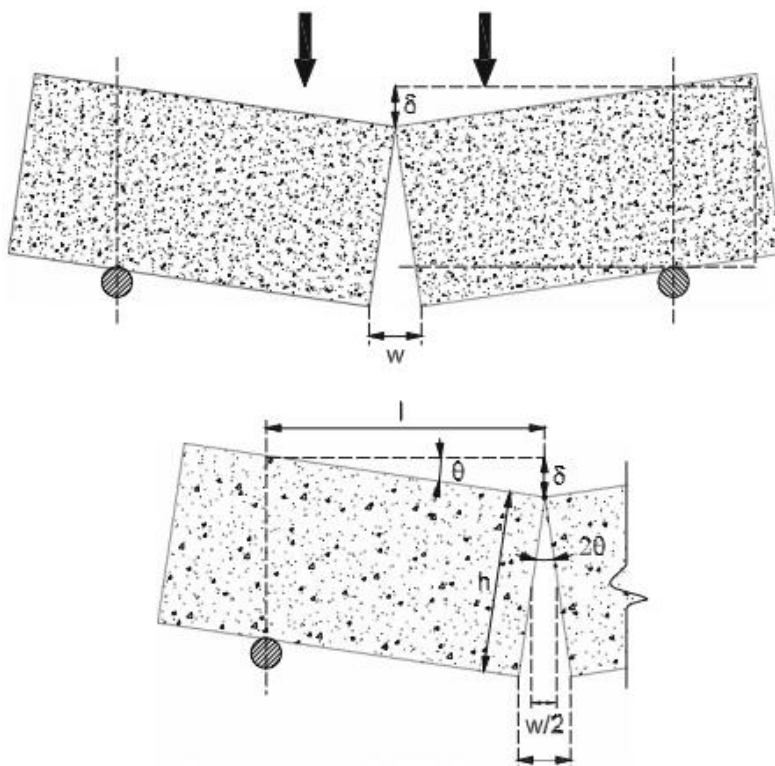


FIGURA A- 2 Cinemática ideal asumida por la prueba Belga desl pues del agrietamiento y parámetros geométricos involucrados

8.4.2 Equivalencia entre δ obtenida por la NBN y CMOD para la RILEM

Este ensayo proporciona un diagrama F - δ NBN. Al determinar el diagrama σ - ϵ a partir de los métodos de la RILEM es necesario determinar la relación CMOD- δ NBN, y a partir de aquí determinar las F que corresponden a CMOD=0,5mm y CMOD=3,5mm. Para ello se determina geométricamente la relación CMOD- δ suponiendo que con la aparición de la fisura el comportamiento de la probeta responde al esquema de la siguiente figura con dos bloques rígidos articulados en la fisura:

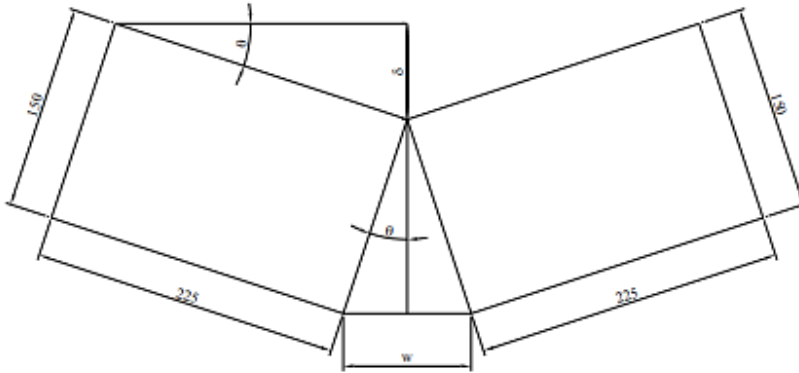


FIGURA A- 2 Abertura de la fisura en el ensayo NBN

De la Figura anterior se desprende que la relación entre el ángulo θ y la abertura de fisura w es:

$$\text{sen}\theta = \frac{W_{\text{NBN}}/2}{150} = \theta \quad \text{Ecuación (8-1)}$$

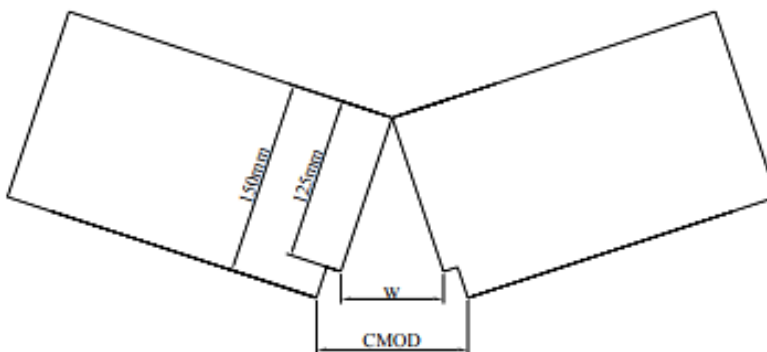
La relación entre θ y δ :

$$\text{sen}\theta = \frac{\delta_{\text{NBN}}}{225} = \theta \quad \text{Ecuación (8-2)}$$

Finalmente la relación w - δ :

$$\delta_{\text{NBN}} = \frac{225}{300} * W_{\text{NBN}} \quad \delta_{\text{NBN}} = 0.75 * W_{\text{NBN}} \quad \text{Ecuación (8-3)}$$

Tomando en cuenta que la fisura en el hormigón para el ensayo RILEM no se abre donde se mide el CMOD, sino en el fondo de la entalla. Por lo tanto, la apertura de fisura real en función del CMOD es:

FIGURA A- 2 Relación w -CMOD para ensayo RILEM

$$W_{\text{RILEM}} = \text{CMOD}_{\text{RILEM}} * \frac{125}{15} = 0.83 \text{ CMOD}_{\text{RILEM}} \quad \text{Ecuación (8-4)}$$

La relación definitiva entre la flecha del ensayo belga y el CMOD del ensayo RILEM es la siguiente:

$$\delta_{\text{NBN}} = 0.75 * W_{\text{NBN}} \quad \text{Ecuación (8-5)}$$

$$= 0.75 * W_{\text{RILEM}} = 0.75 * 0.83 \text{ CMOD}_{\text{RILEM}}$$

$$\delta_{\text{NBN}} = 0.65 * \text{CMOD}_{\text{RILEM}} \quad \text{Ecuación (8-6)}$$

Sustituyendo el los puntos 0,5mm y 3,5mm, se obtienen las δ_{NBN} equivalentes con las que se obtendrán las fuerzas para el posterior cálculo de las tensiones residuales:

$$\text{CMOD } 0,5 \quad \delta_1 = 0,3125\text{mm}$$

$$\text{CMOD } 3,5 \quad \delta_2 = 2,18\text{mm}$$

8.4.3 Cálculo del diagrama de interacción según la ehe 2007

Debido a que la nueva EHE utiliza el ensayo RILEM para determinar las resistencias residuales del hormigón reforzado con fibras, la relación entre la flecha NBN y la abertura de fisura es la misma que para el caso RILEM de forma que:

$$\delta_{\text{NBN}} = 0.625 * \text{CMOD}_{\text{FIB}} \quad \text{Ecuación (8-7)}$$

Sustituyendo en el punto 2,5mm, se obtiene la δ_{NBN} equivalente con las que se obtienen las fuerzas para el posterior cálculo de las tensiones residuales:

$$\text{CMOD } 0,5 \quad \delta_1 = 0,3125\text{mm}$$

$$\text{CMOD } 2,5 \quad \delta_3 = 1,56\text{mm}$$

Mediante lo expuesto en el Anejo 2 es posible determinar las relaciones desplazamiento-abertura de grieta que sirve para la caracterización del material.